88005-Ch.4

NEW BRUNSWICK RIVER ICE MANUAL

Prepared by
THE NEW BRUNSWICK SUBCOMMITTEE ON RIVER ICE

Environment Canada
Inland Waters Directorate

New Brunswick Department of the Environment

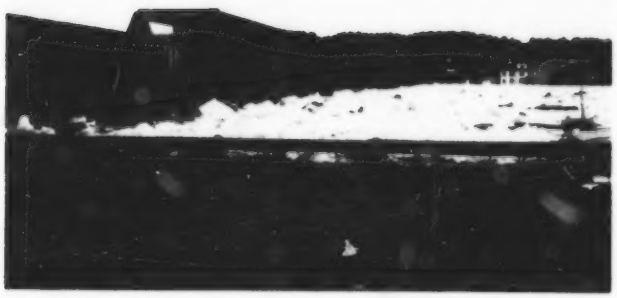
August, 1989

90-05384/

PREFACE

The New Brunswick Subcommittee on River Ice was established under the Flood Forecasting Technical Committee within the Canada-New Brunswick Flood Damage Reduction Program (FDRP). The following agencies are represented on the Subcommittee: the New Brunswick Department of the Environment (NBDOE), the New Brunswick Electric Power Commission (NBEPC), the University of New Brunswick (UNB), and Environment Canada as represented by the National Water Research Institute (NWRI), the National Hydrology Research Institute (NHRI), the Atmospheric Environment Service (AES), the Water Resources Branch (WRB) and the Water Planning and Management Branch (WPM).

The Subcommittee plays a leading role in identifying ice related problems and in coordinating activities directed at their solution. This Manual was produced to inform the public of general river ice processes, specific characteristics of the ice regime in New Brunswick rivers, ice monitoring techniques and predictive and control methodologies.



Ice jam at a railway bridge.

ACKNOWLEDGEMENTS

This Manual could not have been produced without the close cooperation of the member agencies of the New Brunswick Subcommittee on River Ice. Special recognition is given to the following :

Editors:

N.E.	Elhadi	NBDOE
J.G.	Lockhart	FDRP

Authors:

S.	Beltaos	NWRI
B.C.	Burrell	NBDOE
K.S.	Davar	UNB
J.	Dublin	AES
S.	Ismail	NBEPC
R.J.	Lane	WRB
T.D.	Prowse	NHRI

Reviewers:

J.E.	Anderson	NBDOE
T.M.	Humes	WPM

Bridge collapsing under ice forces.

TABLE OF CONTENTS

TITLE	PAGE
PREFACE	i
ACKNOWLEDGEMENTS	i
TABLE OF CONTENTS	ii
LIST OF FIGURES	ii
LIST OF PLATES	ii
1 INTRODUCTION	1
2 RIVER ICE PROCESSES	1
2.1 FREEZE-UP	1
2.1.1 Border Ice	1
2.1.2 Frazil Ice	2
2.1.3 Thermal Ice Cover	3
2.2 BREAKUP	3
2.2.1 Winter Breakup	3
2.2.2 Spring Breakup	4
2.3 ICE JAMS	4
3 RIVER ICE REGIME	4
3.1 CLIMATE	4
3.2 MORPHOLOGY	5
3.3 NEW BRUNSWICK ICE REGIONS	6
4 RIVER ICE MONITORING	7
4.1 GROUND-BASED MONITORING	7
4.1.1 Location of Monitoring Sites	7
4.1.2 Frequency of Observations	7
4.1.3 Freeze-up Observations	7
4.1.4 Winter Observations	7
4.1.5 Pre-Breakup Observations	8
4.1.6 Breakup Observations	8
4.1.7 Ice Jam Observations	8
4.1.8 Post-breakup Observations	9
4.2 SATELLITE MONITORING	9
4.3 AERIAL SURVEYS	9
5 PREDICTIVE METHODS	10
5.1 FREEZE-UP JAMS	10
5.2 BREAKUP	11
5.2.1 Ice Decay	11
5.2.2 Initiation of Breakup	11
5.3 BREAKUP JAMS	12
6 ICE CONTROL	14
6.1 ICE JAM MITIGATION	14
6.1.1 Fixed Structures	14
6.1.2 Ice Booms	15
6.1.3 Channel Modification	15
6.1.4 Dusting	15
6.1.5 Blasting	15
6.1.6 Ice Cutting	16
6.1.7 Mechanical Ice Removal	16
6.2 ICE ADHESION	16
6.3 WINTER NAVIGATION	16
REFERENCES	17

LIST OF FIGURES

TITLE	PAGE
1 Conditions for the Formation of Border Ice	2
2 River Ice Formation Processes	2
3 Average Annual Accumulated Freezing Degree Days	4
4 Total Annual Precipitation	5
5 Total Annual Snowfall	5
6 River Ice Regions and Areas of Major Ice Jams	6
7 Profile of a Floating Jam with an Equilibrium Reach	12
8 Dimensionless Relationship for Breakup Jam Equilibrium Levels	12
9 Schematic of Surge Characteristics	13
10 Surge Characteristics	13

LIST OF PLATES

TITLE	PAGE
1 Border Ice Formation	2
2 Frazil Ice Accumulation (Ice Pans)	3
3 Longitudinal Hinge Cracks	3
4 Post-breakup Shear Wall	9
5 Ice Cover Formation (Leading Edge)	11
6 Breakup Jam	12

1. INTRODUCTION

River ice related problems are common in New Brunswick throughout the winter and spring seasons; from early winter when frazil and anchor ice are generated, through the formation and growth of ice covers, to the eventual breakup and jamming in the spring. In many areas of the Province, ice jams frequently cause flooding, destruction of bridges and extensive socio-economic damages.

Residents of New Brunswick need hardly be reminded of recent ice related events which were of near catastrophic proportions. In 1970, ice runs and jams destroyed 32 bridges and resulted in about $ 14 million in damages, in 1987 dollars. In 1976, ice jams on the Saint John River resulted in severe flooding and damages at Perth-Andover and Woodstock that totalled $ 3.6 million. Most recently, in 1987, ice jamming at and below Perth-Andover resulted in about $30 million in damages. The undocumented and intangible damages would substantially increase these amounts.

Recently, considerable advances have been made in understanding and predicting ice problems and in minimizing the associated socio-economic damages. It is appropriate that this progress in scientific knowledge be made available to the concerned public as their understanding and cooperation is crucial in effectively managing ice related problems in rivers. The prime purpose of this Manual is to present the basics of river ice processes, as well as to identify ice problems and mitigative techniques.

The scope of this Manual is limited to the presentation of a simple and concise review of current knowledge of the subject. In Section 2, a description of the various ice processes is presented. A summary of climatic conditions and a description of the ice regime in New Brunswick are presented in Section 3. In Section 4, various ice monitoring techniques as well as the essential data to be collected through ground-based monitoring programs are given. Predictive methods and quantitative applications are summarized in Section 5; while methods of ice control are described in Section 6. Many of the scientific and engineering analyses involve complex theoretical and computational procedures which cannot be described in a publication of this nature. The interested reader is referred to the references cited herein for further information.

2. RIVER ICE PROCESSES

Most rivers in New Brunswick are ice-covered during much of the winter season. River ice processes can normally be classified as either freeze-up or breakup. The characteristics of these processes are dependent upon the weather and flow conditions prevalent during the freeze-up and breakup periods. The predominant river ice processes and characteristics observed in New Brunswick rivers are presented in the following sections.

2.1 FREEZE-UP

Air temperature and flow velocity are the two most important factors affecting ice processes during the freeze-up period. Heat exchange at the open water surface is the primary process by which the river water temperature drops in the fall. Heat transfer depends upon: solar or short-wave radiation, long-wave radiation, evaporation or condensation, convection, and precipitation. Corresponding heat loss rates (rates of heat transferred per unit area) can be calculated according to hydrothermal and meteorologic principles (Michel, 1971). Minor heat exchanges may also occur at the stream bed due to: groundwater flow, heat stored in bottom sediments, geothermal heat and flow friction. These means of heat exchange are generally negligible but may become significant when an ice cover is present.

For simplicity, the heat loss rate is often calculated as the product of the difference between air and water temperatures and a factor reflecting local and meteorological conditions. For example, this factor was found to range from 20 to 60 watts/m^2°C for the St. Lawrence River (Shen et al, 1984; Prowse, 1987). By knowing the rate of heat loss and stream hydraulics, it is possible to predict the water temperature. Ice formation is imminent when the water temperature drops to near 0°C.

A description of the freeze-up processes for the most common types of ice observed in New Brunswick rivers are described below.

2.1.1 Border Ice

The first ice to appear on a river usually forms along the banks where the velocity is low, Plate 1. Border ice grows vertically and also laterally toward mid-stream. Lateral growth can take place even with the main water temperatures slightly above freezing, depending on the flow velocity and meteorologic conditions, Fig. 1 (Devik, 1964). Presently, the rate of lateral growth can best be

predicted by using empirical relationships, developed by Newbury, 1968 and Matousek, 1984.

PLATE 1. BORDER ICE FORMATION.

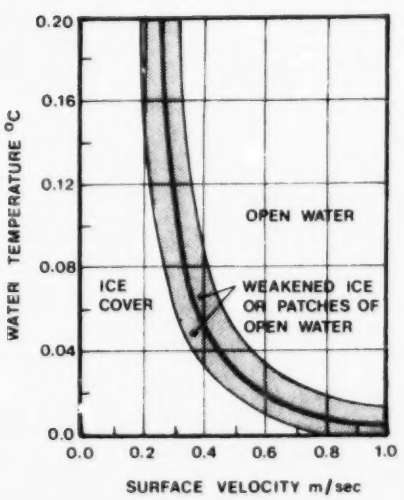


FIG. 1. CONDITIONS FOR THE FORMATION OF BORDER ICE.

2.1.2 Frazil Ice

Frazil ice is very common in New Brunswick rivers at freeze-up as well as through the winter in ice-free turbulent reaches. It is made up of tiny ice particles which result from the slight supercooling of water (to approximately -0.05°C). The amount of frazil ice is proportional to the extent of the open water area and the rate of heat loss.

In supercooled water, frazil particles adhere to each other leading to the formation of frazil "clusters" or "flocs" which are buoyant and rise to the surface. This property of particle adherence normally results in one of the following ice accumulation forms, Fig.2:

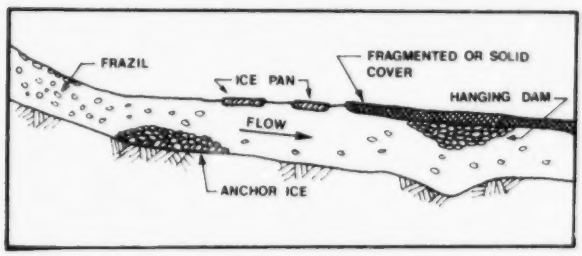


FIG. 2. RIVER ICE FORMATION PROCESSES.

(a) Ice Pans: As the frazil clusters grow in size, they form ice pans, Plate 2. These ice pans may stop at a channel constriction or may come to rest against an ice cover at river sections where the velocity is less than 0.6 m/s or where the Froude number is less than 0.08. The Froude number is defined as $(V/\sqrt{gH})$; where V is the mean velocity, g is the acceleration of gravity and H is the mean depth. As the water surface continues to lose some of its heat to the atmosphere, these ice pans freeze together to form a continuous ice cover.

(b) Hanging Dams: The accumulation of frazil ice against an ice cover progresses in an upstream direction when the velocity at the upstream edge of the cover is low. At high velocities,the frazil is transported downstream under the ice cover where it adheres to the undersurface in a low velocity area. As the supply of frazil continues, the ice accumulation under the cover grows in size forming a "hanging dam". A hanging dam can cause extensive blockage of the flow area resulting in increased upstream water levels and potential flooding.

PLATE 2. FRAZIL ICE ACCUMULATION (ICE PANS)

(c) Anchor Ice: In turbulent reaches of wide, shallow rivers, frazil particles may adhere to the river bed and accumulate to form "anchor" ice. Anchor ice generally forms in the evening when the rate of heat loss is the greatest and supercooling occurs. Anchor ice can cause a significant blockage of the flow cross-section resulting in local flooding. Little is known about anchor ice formation, growth and detachment.

2.1.3 Thermal Ice Cover

In rivers with velocities less than 0.6 m/s and water temperatures below the freezing point, ice crystals form on the surface and rapidly link together to create a thin ice sheet. Once a thin ice sheet has formed, it begins to grow downward by freezing at the ice-water interface. Heat loss is retarded by the ice cover itself and by snow cover that may be present. Where freezing takes place in a frazil accumulation, the rate of thickening of the solid ice layer is inversely proportional to the porosity of the accumulation. A simple, semi-empirical formula is often used to calculate the solid ice thickness, h_i, in cm as:

$$h_i = a_i \sqrt{D_F} \qquad (1)$$

in which D_F = accumulated degree-days of freezing (°C-days) and a_i = empirical coefficient. Values of a_i have been found to be as follows: a_i = 2.7 for a windy lake without snow; 1.7 - 2.4 for an average lake with snow; 1.4 - 1.7 for an average river with snow; and 0.7 - 1.4 for a sheltered small river with rapid flow.

In central New Brunswick, the thickness of thermal ice covers typically ranges between 38 and 80 cm; depending on the severity of the winter season.

2.2 BREAKUP

Warm weather normally melts the snow pack and weakens the ice cover. In addition, longitudinal and transverse cracks, Plate 3, further reduce the strength of the cover. The rate of the snowmelt and rainfall and the subsequent runoff are the major factors affecting the breakup process. A high rate of snowmelt and rainfall, and consequently a rapid increase in river flows, normally results in an early breakup of a relativly strong ice cover. This form of breakup may occur in mid-winter or early spring and generally causes the worst flooding. On the other hand, slow snowmelt causes a gradual increase of the river flow and a gradual decay of the ice cover resulting in significantly lower peak water levels.

PLATE 3. LONGITUDINAL HINGE CRACKS.

2.2.1 Winter Breakup

Unseasonally warm weather is frequently experienced in central and southern New Brunswick during the late January - early February period. It is occasionally accompanied by a moderate amount of rain resulting in a high rate of snowmelt and consequently high river flows. As a result, increased downstream forces are exerted on the ice cover causing localized breakup and, in some cases, ice jams and associated flooding. When the normal mid-winter freezing temperatures return, the ice jam may freeze and consolidate in place. In many cases this condition results in more severe ice jamming and flooding the following spring.

2.2.2 Spring Breakup

In late March - early April, a general warming trend prevails resulting in the melting of the snow pack and the gradual thawing of the ice cover. This process is sometimes aggravated by rainfall and results in a decrease in ice cover strength and increased streamflows and water levels. These phenomena cause an increase in the forces exerted on the ice cover and also result in the formation of hinge cracks parallel to both banks which further reduce the resistance capabilities of the ice cover. At some point, as the downstream forces exerted on the cover increase while the resistance forces decrease, the ice cover begins its movement resulting in the breakup of the ice sheet into pieces progressing in a downstream direction. The progress of the breakup depends on flow conditions, the geometry of the river channel and the weather conditions immediately preceeding and during the breakup period.

As the broken ice continues its travel downstream, its momentum contributes further to the breakup of the ice sheet until it lodges at a point of greater resistance; such as at a channel constriction, at the edge of a strong ice cover, or a combination of both. The duration of the ice lodgement at a particular location has a significant impact on the progression of the breakup,the upstream water levels and the extent of flooding.

2.3 ICE JAMS

Ice jams are the most dramatic events caused by the breakup and rapid accumulation of fragmented river ice. Ice jams often cause sudden massive increases in the water level resulting in severe flood damages, in some cases exceeding those associated with extreme open water flood events. In New Brunswick, approximately seventy percent of recorded flood damages are caused by ice related floods.

There are locations which are more susceptible to ice jam formation than others. These include the confluence of two rivers, channel constrictions, sharp bends, islands, bridge piers, shallow river reaches, the edge of a solid ice cover, and at sudden changes in the slope of the water surface. Often ice jams are caused by a combination of two or more of these factors.

The severity of an ice jam event is generally influenced by: river flow, volume and strength of river ice, length of the breakup period, rate of heat transfer, snow depth, and precipitation. Of these, river flow is the single most important determinant of ice jam severity.

3. RIVER ICE REGIME

3.1 CLIMATE

Climate is an important factor affecting ice cover formation, growth and breakup. The climate of New Brunswick is affected by its proximity to the Atlantic Ocean and to a lesser degree by the Gulf of St. Lawrence. However, with the exception of the areas adjacent to the Bay of Fundy and the Gulf of St. Lawrence, the climate is predominantly continental, with warm humid summers and long cold winters but without a dry season.

Temperatures vary considerably over the Province with mean annual temperatures decreasing in a northerly direction from 6°C in the extreme southwest of the Province to about 2°C in the area north of Edmundston. During January, the coldest month of the year, monthly average temperatures range from -6°C in the southwest corner of the Province to -13°C in the northern areas. In the northern part of the Province, winter minimum temperatures of -35°C are not uncommon. The frost free period varies from approximately 100 days in the north to 140 days in the south. Average annual accumulated freezing degree days, Fig. 3, can be used as an indication of the severity of winters. Values range from 500°C-days in the southwest to 1500°C-days in the northwest.

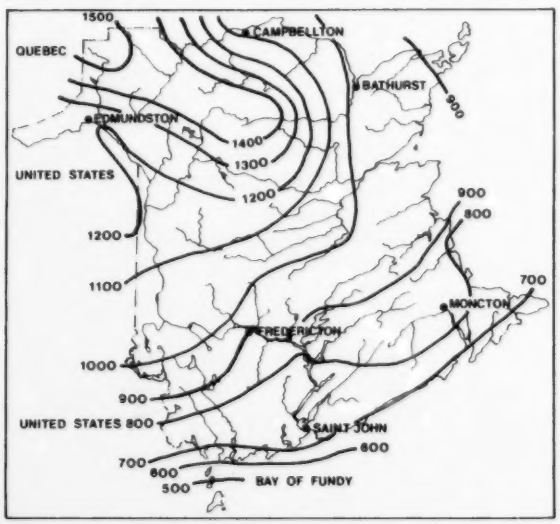


FIG. 3. AVERAGE ANNUAL ACCUMULATED FREEZING DEGREE DAYS (°C-Day)

Annual precipitation over the Province varies from about 950 mm at some locations in the northwest to about 1450 mm in the south, just north of the Bay of Fundy, and over higher elevations in central New Brunswick, Fig. 4. The total annual snowfall in New Brunswick varies from 200 cm in the south to 400 cm in the north and over high terrain south of Moncton as illustrated in Fig. 5. The percentage of snowfall of the total precipitation generally ranges from 15 in the southern areas to 40 in northern areas. On the average, New Brunswick experiences more snowfall than most other areas of Canada. Winter snow cover usually melts and runs off in April and frequently during the first half of May.

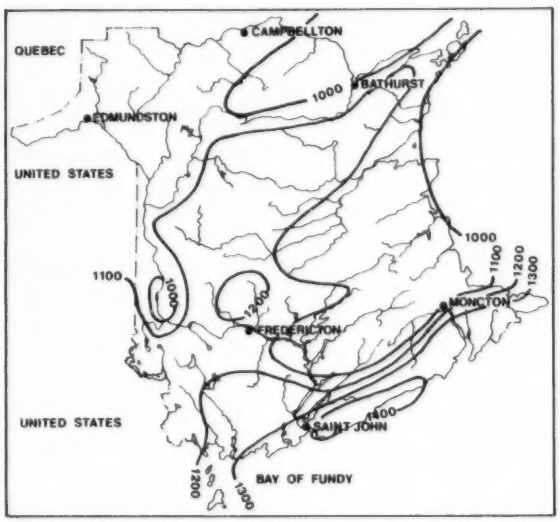


FIG. 4. TOTAL ANNUAL PRECIPITATION (mm).

The province lies in the path of many extra-tropical storms spawned along the eastern seaboard of the United States. Extra-tropical storms can occur any time of the year, but are most frequent and severe during the winter season when the contrast between cold continental and warmer maritime air is the greatest. Strong flows of cold air forming behind developing storms contribute greatly to the intensification of these storms. Storm tracks have a southwest to northeast orientation, and their precipitation patterns tend to be elongated in the direction of the storm tracks. Thus, although precipitation may be general over much of the Province for a given storm, the heaviest precipitation is usually concentrated in a relatively narrow band, and the intensity and amounts fall off rapidly in the southeast and northwest directions from the track of the storm.

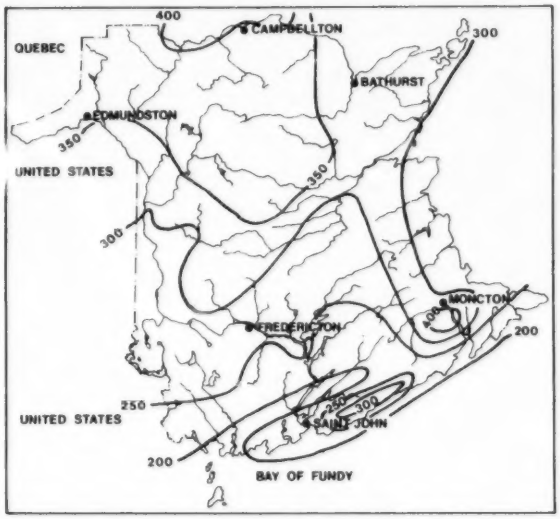


FIG. 5. TOTAL ANNUAL SNOWFALL (cm).

Mid-winter thaws leading to significant snowmelt are most frequent in the southern areas of the Province and decrease in frequency northward. Significant snowmelt due to mid-winter thaws are rare in the northern areas of the Province as are significant winter rainfalls.

3.2 MORPHOLOGY

The physical characteristics of a river basin and channel geometry play an important role in the river ice regime. Although most New Brunswick rivers have some form of ice cover much of the year, there are a few rivers on which complete solid ice covers do not form. Strong ice covers may not form at the outlet of lakes or reservoirs where water is slightly warmer and more turbulent. An example is the St. Francis River near the outlet of Glasier Lake. Also ice covers may not form in steep, fast-flowing streams even though great quantities of frazil are produced. For example, the Dunbar Stream, a small steep tributary of the Nashwaak River, remains open for much of the winter season. Finally, ice covers may not form in streams which have a supply of warmer water

from springs in the bed or banks. For example, an ice sheet usually does not form on most reaches of Cold Stream(Northeast of the Town of Hartland) although thick solid ice covers do form on neighbouring rivers.

Many New Brunswick rivers empty into the sea and the lower reaches are tidal. They are often characterized by wider cross-sections than the upstream reaches. Significant ice accumulations in these estuaries are believed to result when a period of freezing temperatures coincides with the greatest differences in neap and subsequent spring tides. During this period, vertical ice walls can occur along the banks in a matter of days, such as in the upper reaches of the Petitcodiac and Memramcook Rivers where ice walls can reach a height of 5 m. During the spring, broken ice often accumulates near the upstream limits of estuaries, but severe ice jamming does not occur frequently (Desplanque and Bray, 1984).

3.3 NEW BRUNSWICK ICE REGIONS

A delineation of regions with approximate similar river ice regimes is shown in Fig. 6. This is based on historical ice thickness data (average ice thickness is approximately 50 cm), visual observation of ice conditions as well as climatic characteristics. This figure, also, illustrates the areas of major ice jams in the Province.

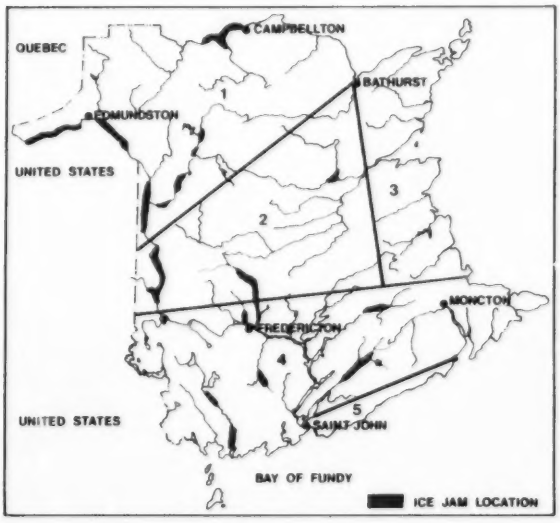


FIG. 6. RIVER ICE REGIONS AND AREAS OF MAJOR ICE JAMS.

Region 1, located in northwestern New Brunswick, is typified by the formation of above average ice thickness and a heavy snow cover. Severe mid-winter thaws and associated ice jams are very rare. Ice breakup normally occurs as a result of snowmelt during mid April. Resulting ice jams on rivers such as the Restigouche can be very severe.

In Region 2, located in central New Brunswick, river ice thickness is generally average to above average, and the snow cover is about average. The area seldom experiences mid-winter thaws that result in ice breakup but moderate to severe ice jams are prevalent in the spring.

Rivers in Region 3, which lies along the eastern coast, have average ice cover and above average snow cover. Mid-winter breakups are rare and spring breakup events are usually not severe.

In Region 4, extending across southern New Brunswick, rivers normally have a thin to average ice cover and a much lighter snow cover than northern areas. Mid-winter thaws and rain events are more common often resulting in early breakup and sometimes severe ice jams similar to that which occurred during February 1981 on the Kennebecasis River causing extensive flooding in the Sussex area.

In Region 5, along the Bay of Fundy, rivers form average ice cover with heavy snow cover. The area is subject to thaws and sometimes heavy mid-winter rains resulting in early breakup and ice jams of a spectacular nature. A six metre rise in water level has been recorded on the Point Wolfe River during such an event.

There are significant differences in the freeze-up and breakup dates between streams in the northern and southern portions of the province. Ice begins to form on northern rivers, such as the Restigouche, about two weeks earlier than on southern streams, such as the Kennebecasis. Typically, breakup on northern streams does not occur until mid-April while southern streams are generally ice free by mid-March.

Although, generalizations with respect to river ice regimes can be made on the basis of climate, it is not possible to apply these generalizations to specific watercourses. An understanding of ice cover characteristics on a particular river is best obtained by monitoring ice conditions over a number of seasons.

4. RIVER ICE MONITORING

In most northern countries, some form of river ice monitoring is conducted either as part of a general data-collection program or to support specific studies. Ice monitoring can be conducted through the use of satellite, aerial or ground-based surveys.

At the National level, two agencies of Environment Canada - the Atmospheric Environment Service (AES) and the Water Survey of Canada (WSC) of the Inland Waters Directorate - conduct ice monitoring programs for general studies of river ice. In the Province of New Brunswick, AES collects ice information at approximately 12 sites, eight of which are on rivers and four on lakes. WSC operates 84 hydrometric stations, at 18 of which detailed ice thickness surveys are conducted.

Detailed information on some New Brunswick rivers such as the Restigouche, Saint John, Meduxnekeag, Nashwaak, and Kennebecasis has been collected by Provincial agencies such as the New Brunswick Electric Power Commission; the Department of Civil Engineering, University of New Brunswick; and the Water Resource Planning Branch, New Brunswick Department of the Environment. A summary of historical ice thickness data is presented in LeBrun-Salonen (1983). River-ice monitoring can be conducted using a variety of approaches depending on the objectives and available resources. The suitability of ground-based surveys, satellite and aerial monitoring techniques for assessing river ice conditions in New Brunswick is considered in the following.

4.1 GROUND-BASED MONITORING

Most operational, river-ice monitoring programs rely on ground surveys to supply most of the ice data. Collection of detailed ice information from ground-based stations usually requires the long-term commitment of dedicated ice observers. Guidelines for ground-based monitoring of river ice are presented in the following sections.

4.1.1 Location of Monitoring Sites

Ice observation sites should be selected at high elevation locations with more than one good vantage point from which to conduct upstream and downstream observations. It is also an advantage to have a hydrometric station and meteorological station in close proximity. Access to a bridge is ideal and creates the added opportunity of obtaining discharge measurements immediately following, and possibly during, breakup.

4.1.2 Frequency of Observations

The frequency of site visits should correspond with the degree of river ice activity. During freeze-up, daily visits should be made. Once an intact ice cover has been established, visits can be reduced to one every two or four weeks, increasing the frequency as the breakup season approaches. In New Brunswick, the onset of breakup conditions can be very rapid when initiated by rain-on-snow events. Once any appreciable melt has occurred or when a major warming period is forecast, observations should be resumed on a daily basis with as many observations per day as possible during the breakup period.

4.1.3 Freeze-Up Observations

Knowledge of the freeze-up processes is critical to the interpretation of stage records, the assessment of discharge, and ultimately to predictive modelling of freeze-up and the forecasting of breakup initiation. The main types of observations to be taken during freeze-up include:

a) Stage and discharge: Monitor the stage leading to freeze-up, particularly at the time of formation of the first permanent ice cover. Measure or estimate discharge before and after freeze-up.

b) Ice types and concentration: Note the type, thickness and lateral extent of border ice. Estimate the dimensions, distribution, and concentration of frazil (or other) ice passing through the river reach. Where close inspection of the ice can be made, provide a qualitative estimate of ice strength and porosity and note the thickness and size of ice pans.

c) Method of freeze-up: Describe whether the formation of the final complete ice cover results from the lodgement of ice particles across the section or from the accumulation of ice particles against a downstream cover.

d) Ice Appearance: Describe the surface of the final ice cover with particular reference to surface roughness and ice types. Estimate overall thickness.

4.1.4 Winter Observations

Ice growth during the winter season determines the quantity and strength of the ice at the time of breakup. The major observations to be made during the main winter period include:

a) Stage and discharge: Monitor the stage during the winter period paying particular attention to periods when the ice cover drops, forming hinge cracks. Discharge measurements can be made less frequently (say once a month).

b) Snow and ice thickness: Measure the depth of the surface snow cover and thickness of the underlying ice cover at a number of points across the river.

c) Cover composition: When measuring ice thickness, note the thickness of different ice layers and the presence of frazil accumulations beneath the main ice cover.

d) Surface ice appearance: Note the surface roughness of the ice cover, including the location of pressure ridges and the presence of shear lines along the shore.

4.1.5 Pre-breakup Observations

a) Stage and discharge: Stage should be measured daily until the water level approaches that recorded at freeze-up. The frequency should then be increased (every eight to twelve hours) especially if mild weather has set in and significant runoff is anticipated. Special efforts should be made to obtain a flow measurement as close to the time of breakup as possible.

b) Snow and ice thickness: Once the main snowmelt period has begun, a final survey of snow and ice thickness across the reach should be made before the surface becomes unsafe for travel.

c) Cover composition: In conjunction with the final thickness survey, note the thickness of the different ice layers and the frazil accumulations beneath the ice cover.

d) Surface conditions: Once surface travel is unsafe, note the percentage of area covered by snow, the presence of ponded meltwater, and when the water drains from the surface.

e) Shore conditions: Note the depth and width of any water accumulating near the shore and if any flow is apparent. Also describe the formation, size, and position of any major cracks, and note when the main ice cover "lifts" and detaches from the shore.

4.1.6 Breakup Observations

Of all the breakup observations, special efforts should be made to obtain accurate records of maximum stage. Crest-stage gauges and time-lapse cameras can be used effectively to monitor the breakup stage.

a) Stage: Water levels should be monitored as frequently as possible. Points of specific interest include: the rate of rise in water level immediately prior to the initial fracturing and movement of the ice sheet, water levels at the time of first ice movement, the maximum water level, and changes in water level as fractured ice clears the reach.

b) Breakup front: The character of a breakup front (upstream end) can vary considerably but there are usually two distinct styles. The first involves a rapid transition from intact ice cover to highly fractured ice. In such cases, estimate the rate at which this fractured breakup front moves downstream. The second style is characterized by a large scale fracturing of the ice sheet followed by a downstream movement of larger pans which often rotate and fracture. In this second case, estimate the speed at which the initial pans move downstream.

4.1.7 Ice Jam Observations

Because ice jams are responsible for the highest water levels on many rivers, information should be collected regarding their mode of initiation and failure, their effect on stage, and even their size in terms of elementary parameters such as length, depth, and width.

a) Stage and discharge: Water levels should be monitored as frequently as possible. Points of specific interest include: the rise in water level when the moving ice stops, the maximum water level while the jam is in place, and the water level when the jam breaks and ice begins to clear from the reach. Make notes or take photographs of the water level at the jam site relative to local objects. Any significant physical changes in the condition of the jam during the survey of water levels should be noted. Estimate the velocity of the breakup front which leads to formation of the ice jam and the velocity of surface ice when the ice jam releases.

b) Areal extent of ice jam: Note whether the ice completely or only partially blocks the river cross-section. If visible, also record the location of the downstream (toe) and upstream (head) ends of the jam.

c) Conditions at toe of ice jam: Describe whether the jam has been halted by some downstream obstruction, such as an intact ice cover, man-made structure, shoal, sharp bend, channel constriction, etc. or stopped by the lodging of ice floes across the river channel.

d) Conditions at head of ice jam: Estimate the size and concentration of incoming ice. Also note whether the ice is accumulating and contributing to upstream progression of the jam or is being transported downstream underneath the jam.

e) Surface conditions: Note the roughness and texture of the ice jam surface. Estimate the distance from shore of any shear lines which have formed from differential movement within the ice jam. Attempt to identify whether the jam is comprised of a single layer of floes or if there has been noticeable compaction and thickening of the jam. Note also if the surface is 'buckled' or has localized ice mounds. This may indicate that ice is grounded on the river bed.

4.1.8 Post-breakup Observations

a) Stage and discharge: Continue regular monitoring of water levels until the majority of floating ice has completely cleared from the reach. Where access is available, such as from a bridge, discharge should be measured as soon as the river becomes sufficiently clear of floating ice. Details should be provided regarding the stability of the flow at the time of the measurement and the relative location of any ice accumulations in the river both upstream and downstream of the measurement site. Observations of stage and discharge should continue until backwater effects due to ice disappear.

b) Ice thickness: Measure the thickness of ice floes that have been stranded along the shore. Where possible, use ice floes which were not badly deformed by ice jam forces. Provide a brief description of the quality or structural integrity of the ice floes, such as whether the ice is heavily candled or remains relatively competent.

c) Shear wall dimensions: Following the clearance of an ice jam, there often remain large masses of strongly deformed ice which have been "plastered" along the shore, Plate 4. The outer edge of these masses, termed the shear wall, normally gives a good indication of ice jam thickness. Once the water level has receded to the point where the base of the shear walls becomes exposed, measure or estimate the overall height of the wall and its distance from the channel bank.

PLATE 4. POST-BREAKUP SHEAR WALL.

4.2 SATELLITE MONITORING

Satellites could provide data concerning river ice conditions during cloud-free days. Coverage could be obtained from one of the following satellites: GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites), Landsat II (previously ERTS, Earth Resource Technology Satellite), NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration; NOAA and TIROS series satellites), and SPOT (Systeme Pour l'Observation de la Terre).

The best ground resolution (10-20m) is provided by the new French SPOT satellite which also has a high orbital frequency and forward and backward observation capability. Using the steering capabilities of the instruments, successive images of New Brunswick can be obtained approximately every three days. The major drawback of the SPOT system is the very high cost of both visible image and computer tape products.

The next best ground resolution (40-80m) is provided by the polar orbiting Landsat. However, the long 18-day interval between successive passes precludes its use for monitoring short-term changes associated with river ice activity.

The most frequent imagery, as often as every 30 minutes, is provided by GOES. The GOES resolution (1-km visible imagery, 8-km in thermal imagery) is considerably worse than Landsat or SPOT. Furthermore, New Brunswick is close to the northern boundary of useful imagery (approx. 50°N).

Daily coverage can also be obtained from the NOAA polar-orbiting satellites at a resolution of 1km. The AVHRR (Advanced High Resolution Radiometer) data collected by these satellites is particularly useful for river ice monitoring.

4.3 AERIAL SURVEYS

Most aerial surveys of ice conditions have employed oblique photography from which reasonably detailed information, such as ice conditions and concentration, or heights of water relative to local features can be extracted.

Aerial surveys can also provide much more detailed quantitative information when vertical, rather than oblique, photography is obtained. Details for conducting river ice aerial surveys are given in Watson (1988). Vertical photography permits the use of stereo-photogrammetric analysis which relies on direct

measurement of relief features and ice/water elevations. Stereo-photography can also be used to obtain detailed measurements of surface ice velocities from which discharge during the freeze-up and breakup periods can be calculated (Prowse et al. 1986; Sherstone 1980).

Airborne Radar Image of the Saint John River below Fredericton (location of ice jams, April 3, 1987). Applications Division of the Canada Centre for Remote Sensing.

5. PREDICTIVE METHODS

Practical questions pertaining to river ice usually involve such matters as forecasting and flood warning as well as the selection of remedial measures. It is possible in some instances to address such questions by simple application of the quantitative understanding and formulae summarized in this section.

Numerical models are well suited to solving a wide variety of river ice problems; however, certain conditions may preclude their use. Physical modelling might then be an alternative or complementary approach. A major difficulty here lies in the scaling down of the strength characteristics of intact ice covers (Michel, 1978).

Often, however, it is essential to simulate the entire ice regime in detail. This can be accomplished using numerical models that are capable of taking into account the detailed geometry of the river, weather variations and the physical ice processes which occur. It should be emphasized, however, that existing river ice knowledge has serious gaps. This is commonly circumvented by making "plausible" empirical assumptions backed by site-specific observations.

5.1 FREEZE-UP JAMS

Full-width ice covers can start by gradual extension and closure of border ice, by arrest of a moving sheet ice, and by congestion of moving ice pans. The latter process is the most common in New Brunswick but not reliably predictable without field observations.

Where congestion occurs and the flow velocity or the Froude number is less than a critical value, a loose cover comprised of a single layer of ice floes is initiated. Critical velocities are typically 0.6 - 0.7 m/s for frazil and slush, while critical Froude numbers are typically 0.08 - 0.1. This cover subsequently solidifies by freezing of the interstitial water. If the leading edge, Plate 5, of this type of cover arrives at an area where the flow velocity or the Froude number is greater than the critical value, the incoming floes will submerge and two types of jams may form, depending on local conditions.

The first type is generally formed where the flow velocity is low enough to cause deposition of the submerging floes under the existing cover. A thickened, porous cover will then form and progress upstream with a thickness, t (Michel, 1971), as:

$$t = 6.25\ V_u^2 / (1 - p)\ g \qquad (2)$$

in which V_u = average flow velocity under the accumulation, g = acceleration of gravity and p = porosity of the accumulation. This type of cover is also known as a "narrow" jam (Pariset et al., 1966).

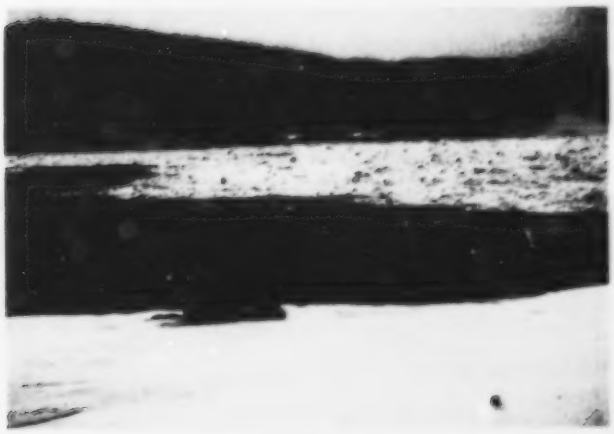


PLATE 5. ICE COVER FORMATION (LEADING EDGE).

As a porous ice accumulation, or jam, propagates upstream, the forces applied on it increase and, under certain conditions, may exceed the jam's capacity to resist them. The applied forces result primarily from the friction created by the flow at the lower boundary of the jam and the weight component of the ice. The jam collapses or "shoves" and thickens until it is just able to resist the applied forces. This type of ice process occurs frequently in hydraulically "wide" rivers. A useful indicator to classify rivers as "wide" or "narrow" can be attained through the use of the relationship ($V^2C^2./B$), where V=mean velocity upstream of the accumulation in m/s, C. is the Chezy's roughness in $m^{0.5}/s$ and B is the river width in m (Acres International Ltd., 1980). "Wide" river jams generally occur when the above relationship is less than 24; otherwise, "narrow" river jams occur.

The second type of jam is formed when the submerging floes are transported by the flow until they come to a region of reduced velocity, and are deposited under the cover. Very large accumulations, called hanging dams, can form in this manner.

5.2 BREAKUP

The decay, fracture, transport and eventual clearance of the ice from a river, are the main processes taking place during the so-called breakup period. Breakup is triggered by warmer weather and is of particular interest because major ice jams with serious potential for damage often result.

5.2.1 Ice Decay

Warmer weather brings about reductions in ice thickness and strength. Melting of the cover can occur at both top and bottom surfaces and is a complex hydrometerologic process. Bilello (1980) proposed a simple formula for thickness reductions in cm, Δh_i, due to mild weather, as:

$$\Delta h_i = a_2\ D_T \qquad (3)$$

in which D_T = accumulated degree-days of "thaw" (above a base of -5°C); and a_2 = empirical coefficient, found between 0.4 and 1.0 cm/°C-d for Northern Canadian and Alaskan rivers.

Ice strength is reduced by penetrating solar radiation, following the increase of ice temperatures to 0°C. Excess heat melts the ice at crystai boundaries (Bulatov, 1972; Ashton, 1983). In extreme cases, the result is "candled" ice which has practically no strength. Prediction of ice strength reduction is, however, complex and uncertain where no calibration data exist (Prowse, 1987).

5.2.2 Initiation of Breakup

When a runoff event is forecast for a specific river reach, it is important to be able to predict whether it will cause breakup of the ice cover. To address this problem in a quantitative manner, it is necessary to define what is the "onset" of breakup or breakup "initiation". This is taken to be the time when the ice cover at a given site is set in motion for a sustained period.

A simple empirical approach has been used whereby the breakup is expected to start when the water level rises above that of the preceding freeze-up by a "critical" amount, H_B. In turn, this rise depends on ice cover thickness, h_i, and strength (Beltaos, 1984; and Shulyakovskii, 1963) and is represented as:

$$H_B = c\ h_i \qquad (4)$$

in which c = site-specific dimensionless coefficient. The coefficient c is dependent on several variables such as

river bends and slope, flow shear stress, ice strength and thickness loss, and steepness of the river banks. Where the thermal effects (thickness/strength losses) on the ice cover are small, the value of c has a maximum of c_o at a given site; where c_o generally falls in the range of 2.2 - 3.5 (Beltaos, 1989). Where the thermal effect is significant, the difference, $c_o h_i - H_B$, has been empirically related to a thermal index (of which the simplest version is the accumulated degree-days of thaw). Such relationships are site-specific (Beltaos, 1984; Tang and Davar, 1984; Burrell et al., 1986) and more field data are needed to enable generalization.

5.3 BREAKUP JAMS

Once breakup has started, ice jams can form and largely control subsequent events. There is little one can do as yet about predicting where and when jams will form, other than refer to past experience. Breakup jams are generally held in place by sections of intact ice cover, Plate 6, and can form anywhere in a given reach. Nevertheless, there are preferred and repeatable sites of formation, depending on the presence of jam-conducive geomorphic or man-made features (e.g. sharp bends, bridge piers, shallows, slope reductions, etc.).

PLATE 6. BREAKUP JAM.

Assuming or knowing that a jam has formed somewhere in a river, it is possible to predict the water levels resulting from the jam. Pariset et al. (1966) distinguished between "narrow" and "wide" channel jams, depending on their ability to resist the applied forces, as explained earlier. The "narrow" type is stable with the thickness given by Equation 2 while the "wide" jam forms after the collapse of a "narrow" one. As a rule, breakup jams are the least capable to resist applied forces and tend to be of the "wide" kind (Beltaos, 1983), thus having the greater potential for flooding and damage. In addition, discharge at breakup is usually much greater than that at freeze-up which further contributes to the flooding potential of breakup jams.

Calculation of actual water levels caused by ice jams can be so complex as to require numerical model applications, however, quick estimates of potential levels can be made using an "equilibrium" condition which defines the largest water depth attainable (H_J), Fig. 7. This depth can be estimated by means of Fig. 8 (Beltaos, 1983); or by using more complex theories which account for channel geometry and jam roughness.

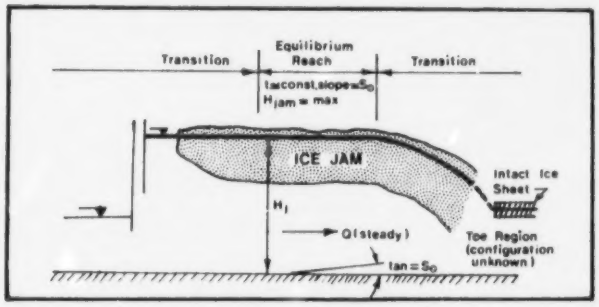


FIG. 7. PROFILE OF A FLOATING JAM WITH AN EQUILIBRIUM REACH.

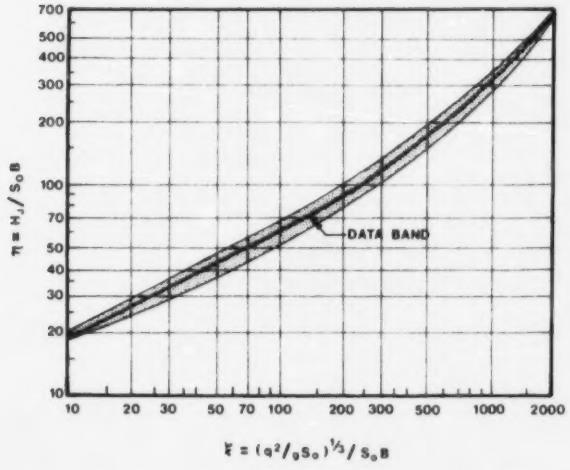


FIG. 8. DIMENSIONLESS RELATIONSHIP FOR BREAKUP JAM EQUILIBRIUM LEVELS.

When a jam suddenly lets go, a steep water wave moves rapidly down river in a surge-like fashion and can cause serious damage with little warning. In general, the conditions leading to jam release are not well understood, however, Ferrick et al (1986) presented field data on this phenomenon. It is possible, however, to roughly predict the surge characteristics using hydrodynamic principles. Ordinarily, this requires the application of a one-dimensional unsteady flow hydrodynamic computer model (Beltaos and Krishnappan, 1982), however, crude estimates can be made by using the simple theory of Henderson and Gerard (1981), summarized in Figs. 9 and 10. It may be noted that the severity of the surge increases with stream size. Large rivers should therefore experience more severe surges which is in accordance with experience.

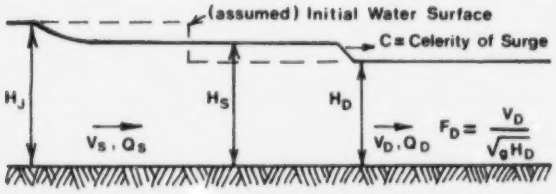


FIG. 9. SCHEMATIC OF SURGE CHARACTERISTICS.

As an example for predicting the potential stage of an ice jam, let us consider the following:

River width (B) = 600 m
Slope (S_o) = 0.0003
Discharge (Q_D) = 1800 m^3/s
Unit discharge ($q=Q_D/B$) = 3.0 m^2/s
Therefore, using the formula in Fig. 8
ξ = 81
Using Fig. 8
η = 55
Then, H_J = 9.9 m

In order to demonstrate what might occur downstream upon the release of the jam described in the above example, lets assume a value of H_D = 4.1 m,
Then,
F_D = 0.12
H_J/H_D = 2.4
Using Fig. 10
$(H_S - H_D)/(H_J - H_D)$ = 0.41
Thus, H_S = 6.5 m
Also, from Fig. 10
C/V_D = 13.4 Thus, C = 9.8 m/s
V_S/V_D = 6 Thus, V_S = 4.1 m/s
Q_S/Q_D = 9 Thus, Q_S = 16,200 m3/s

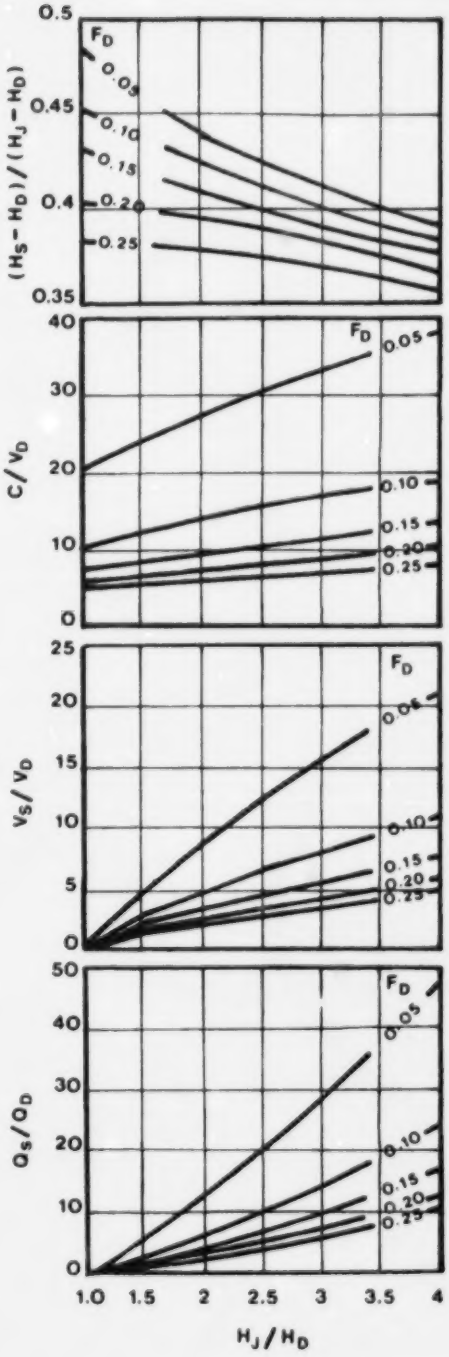


FIG. 10. SURGE CHARACTERISTICS.

It should be noted here that V_S estimated above (about 6 times the downstream velocity) is an unusually large water velocity that under open water conditions may occur only during extreme floods. The celerity of the wave, C, is also very large and would cause very rapid rise of the downstream water levels. The discharge, following the release of the jam, is 9 times the downstream discharge.

By contrast, in a 100 m wide stream of identical slope and unit discharge and an assumed value of H_D = 4.1 m, it can be demonstrated that the downstream effects of the surge is less severe as shown below:

H_J	= 5.2 m	
H_S	= 4.6 m	
C/V_D	= 10.5	C = 7.7 m
V_S/V_D	= 2	V_S = 1.5 m/s
Q_S/Q_D	= 3	Q_S = 900 m^3/s

It should be emphasized here that the above techniques are useful in providing preliminary predictions of ice jam characteristics and an appreciation of the phenomenon of ice jam formation and release. Readers interested in detailed techniques of ice jam prediction may refer to the references listed in this manual.

Highway Blocked by River Ice.

6. ICE CONTROL

It is sometimes desirable to control the ice regime in order to eliminate or lessen the impacts of ice related problems. These problems include ice jam flooding, the loss of hydroelectric power production, the blockage of navigable channels, and damage to hydraulic structures. Examples of various control measures are provided in this section.

6.1 ICE JAM MITIGATION

Ice jam mitigation includes those measures done to eliminate or lessen the problems that may occur due to the formation or release of an ice jam. Considerable understanding of the ice regime, is required in the implementation of any of the following mitigation techniques.

6.1.1 Fixed Structures

Fixed structures are used to stabilize an ice cover or prevent the downstream movement of broken ice. Stabilization of an ice cover prevents its premature breakup thus increasing the chances of the ice melting in place, while at the same time the retention of moving ice floes reduces the supply of ice to potential downstream ice jam locations.

Fixed structures must be designed to withstand applied forces. The forces include the impact of moving ice floes and the thermal expansion of ice sheets. Physical hydraulic modelling may be required during the design and installation of fixed structures to control ice (Perham, 1984).

Groins and jetties can be used to constrict the channel width (Cumming-Cockburn & Associates Limited, 1986) in order to promote "bridging" of ice floes during freeze-up and to raise upstream water levels thereby improving the upstream hydraulic conditions for ice cover stability. Such structures also create a storage place for ice floes at breakup, thus reducing the volume of ice moving downstream.

An ice control dam obstructs the passage of ice in order to prevent ice jam formation downstream (Michel, 1971). Depending on the available reservoir storage in relation to the spring flood magnitude, it may be possible for the flood control structure to retain all contributing upstream ice until it eventually melts. More commonly, however, the available storage is only sufficient

to delay the passage of weaker ice. Ice control structures may, however, initiate ice jams near the upstream limit of the headpond since the momentum of moving ice is arrested considerably by stronger headpond ice and a significant reduction in the hydraulic gradient. An ice control dam does provide high reliability with minimal monitoring and operational requirements; however, other environmental or economic realities may preclude its use.

Weirs are low-head overflow dams built across a stream to raise upstream water levels to create suitable conditions for formation of a stable ice cover or for the accumulation of frazil ice or ice pans. Properly designed weirs can provide reliable control of ice at suitable sites on small rivers during both the freeze-up and breakup periods.

6.1.2 Ice Booms

Ice booms are installed across a watercourse to control the movement of ice. They can be used to reduce the supply of ice to downstream jamming sites by restricting the movement of upstream ice and prolonging the period of ice discharge. Ice booms are most commonly used, however, to stabilize or retain an upstream ice cover where velocities are less than 0.6 m/s or Froude numbers are less than 0.08. Ice booms usually consist of timbers shackled together by chains and held together by cables anchored to the river bed. Pier-mounted booms can also be constructed. For example, the Montreal ice control structure uses floating steel booms or stop logs placed between fixed concrete piers to collect ice floes and to help stabilize the ice cover earlier in winter than otherwise would be the case.

6.1.3 Channel Modification

Research and observations (Calkins et al., 1976) reveal that ice jams tend to form at sites where there are: surface obstructions, river bends, river channel slope changes, constrictions, low velocity pools and shallow river sections.

Channel modifications can be carried out in order to reduce the likelihood of ice jams. Such modifications include the removal of constrictions and surface obstructions such as piles, old bridge piers, and natural islands as well as the removal of sand and gravel bars. Channel diversions can also be constructed to by-pass an obstruction to ice and water flow. However, channel modifications should be evaluated on a site-specific basis.

In New Brunswick, a permit must be obtained before an alteration is made to the bed or banks of a watercourse. Projects are reviewed in order to protect individuals or structures, as well as fish habitat and the environment, which may be affected by the alteration.

6.1.4 Dusting

Dusting is the spreading of a thin layer of a dark substance over an ice cover in order to weaken it because of increased heat absorption. The dusting material could be sand, fly ash, or another dark substance that is environmentally safe.

Dusting can be done for the purpose of preventing the occurence of an ice jam at sites of known ice jamming or near highly developed flood prone areas. Dusting is not effective on rough ice surfaces such as ice jams since the heat absorption property of such surfaces is very low.

The timing of dusting operations is very important. If it is done too early, it could be covered by a late snowfall which would reduce its effectiveness. If attempted too late, the ice could become too weak and unsafe to allow the spreading of the dusting material, or the ice could breakup and jam before the dusting material takes effect.

6.1.5 Blasting

Blasting may be used to break an ice cover into floes which can be transported by the water downstream or to weaken a solid ice cover prior to the arrival of upstream ice. The explosive charge is usually placed in the water underneath the ice. A much greater charge would be required if it is placed on or within the ice.

Properly placed explosives may be used for removing ice jams by blasting the ice sheet holding the jam in place. The ideal time to release a jam is just after it has formed. If the flow has dropped, blasting the jam will be ineffective due to the lack of sufficient water to carry the loosened ice downstream.

Blasting ice jams is rarely effective and is dangerous to the blasting crew and neighbouring property. The placement of an explosive charge is dangerous work that must only be performed by trained personnel. Adequate safety, rescue and first aid measures should be in place before the commencement of work.

6.1.6 Ice Cutting

Ice cutting refers to the cutting, sawing, or splitting of an ice cover to cause it to melt faster or to break it into smaller pieces that will be transported more readily when water levels rise. Ice cutting can only be done if the ice cover is strong enough to support cutting machinery and crews.

The City of Ottawa has a program of cutting and blasting ice in the Rideau River to prevent the formation of ice jams. Strips of about 15 - 20 m wide are cut where the ice has a tendency to remain solid. Then crews drill and blast the ice at the downstream end prior to the arrival of spring flows.

Ice cutting has also been done to prevent ice jams in the Beaurivage River near Quebec City. Ice cutting has many advantages over blasting techniques; it breaks more ice than blasting, it is only one-third the cost, has no environmental impacts and is generally safer.

6.1.7 Mechanical Ice Removal

For small streams accessible from the banks, it may be possible to remove ice using construction equipment, such as back hoes and drag lines, before ice jams form. The efficient and safe removal of ice depends, in part, upon the equipment operator whose judgement must be exercised as ice removal operations progress.

6.2 ICE ADHESION

The adhesion of supercooled frazil ice to structures (trash racks, hydraulic gates, etc.) is another major problem. Several solutions to this problem exist.

One approach is to heat the surface to which ice adheres. This can be accomplished by applying steam or warm water to the affected area, or by incorporating electrical resistance or steam/hot water heating within the structure. Usually the objective is to keep the surface temperature above the freezing point so that ice will not adhere to it.

Another approach is to use construction materials and coatings to which ice bonds weakly so that it can be easily removed. One coating that has been effective is a plastic type liner made from a copolymer solution of toulene and silicone oil (Ashton 1986).

6.3 WINTER NAVIGATION

There is little or no inland navigation on New Brunswick rivers during the ice season, with the exception of ferry operations across rivers and limited penetration of ocean-going vessels into river estuaries. Icebreakers are commonly used to control river ice for the purpose of navigation.

Air bubbler systems can also be effective in preventing the growth of a solid ice cover at navigation locks, port facilities and ferry crossings, but are impractical for long river reaches. In a bubbler system, an air-driven warm water jet is directed upward to melt or suppress the growth of river ice. The plume of warm flowing water created by the rising air bubbles spreads as it rises and melts the ice cover (Ashton, 1986). The most important requirement for successful performance of an air bubbler system is a supply of warmer water near the channel bed (U.S. Department of the Army, 1982).

Homes surrounded by ice and rising water.

REFERENCES

Acres International Ltd. (1980), "Behavior of Ice Covers Subject to Large Daily Flow and Level Fluctuations", for the Canadian Electrical Association.

Ashton, G.D. (1983), "First Generation Model of Ice Deterioration", Proc. of Conference on Frontiers in Hydraulic Engineering, ASCE, New York, pp. 273-278.

Ashton, G.D. (1986), "River and Lake Ice Engineering", Water Resources Publications, Littleton, Colorado, U.S.A.

Beltaos, S. and Krishnappan B.B. (1982), "Surges from Ice Jam Releases: A Case Study", Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 9, No. 2, pp. 276-284.

Beltaos, S. (1983), "River Ice Jams: Theory, Case Studies and Applications", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE,Vol. 109, No. 10, pp. 1338-1359.

Beltaos, S. (1984), "Study of River Ice Breakup using Hydrometric Station Records", Proceedings Workshop on the Hydraulics of River Ice, Fredericton, N.B., Canada, pp. 41-59.

Beltaos, S. (1989), "Initial Fracture and Breakup of River Ice Cover", National Water Research Institute, Burlington, Ontario.

Bilello, M.A. (1980), "Maximum Thickness and Subsequent Decay of Lake, River and Fast Sea Ice in Canada and Alaska", U.S. Army CRREL Report 80-6, Hanover, N.H.

Bulatov, S.N. (1972), "Computation of the Strength of the Melting Ice Cover of Rivers and Reservoirs and Forecasting of the Time of its Erosion", Proc. Symposium on the Role of Snow and Ice in Hydrology, Banff, Canada, pp. 575-580.

Burrell, B.C.,Tang,P.W., Lane, R., and Beltaos, S. (1986), "Study of Ice Breakup in the Meduxnekeag River, N.B., Using Hydrometric Station Records", Proc., Fourth Workshop on Hydraulics of River Ice, Montreal.

Calkins, D.J., Hulton, M.S. and Marlar, T.L. (1976), "Analysis of Potential Ice Jam Sites on the Connecticut River at Windsor, Vermont", Report 76-31, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, U.S. Army Corps of Engineers. Hanover, New Hampshire.

Cumming-Cockburn & Associates Ltd. (1986), "Ice Jams on Small Rivers, Remedial Measures and Monitoring", Willowdale, Ontario.

Desplanque, C. and Bray, D.I. (1984), "Winter Regime in the Tidal Estuaries of the Northern Portion of the Bay of Fundy, N.B.", Proceedings Workshop on Hydraulics of River Ice, Fredericton, N.B.

Devik,O. (1964), "Present Experience on Ice Problems Connected with the Utilization of Water Power in Norway", Journal of the International Association of Hydraulic Research, vol. 2, no. 1, pp. 25-40.

Ferrick, M., Lemieux G., Mulherin N. and Dement W (1986), "Controlled River Ice Cover Breakup, Part 1. Hudson River Field Experiements", IAHR Symposium on Ice, Iowa City, Iowa, USA.

Henderson, F.M. and Gerard R. (1981), "Flood Waves Caused by Ice Jam Formation and Failure", Proceedings IAHR Symposium on Ice, Quebec, Canada, Vol. 1, pp. 277-287.

Le Brun-Salonen, M.L. (1983), "Average Solid Ice Thickness in New Brunswick Rivers", Report No. 2.03, Prepared under the New Employment Expansion Development Program, Fredericton, N.B.

Matousek, V. (1984), "Regularity of the Freezing-up of the Water Surface and Heat Exchange Between Water Body and Water Surface", IAHR Ice Symposium Proceedings, Hamburg.

Michel, B. (1971), "Winter Regime of Rivers and Lakes", U.S. Army CRREL Monograph 111-B1a, Hanover, N.H.

Michel, B. (1978), "Ice Mechanics", Les Presses de l'Universite Laval, Quebec, Canada.

Newbury, R.W. (1968), "The Nelson River: A Study of Subarctic River Processes", Ph.D. Thesis. John Hopkins University.

Pariset, E., Hausser R.and Gagnon A. (1966), "Formation of Ice Covers and Ice Jams in Rivers", Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 92 (HY6), pp. 1-24.

Perham R.E. (1984), "Ice Sheet Retention Structures", Proceedings of the IAHR Ice Symposium, International Association for Hydraulic Research, Hamburg, West Germany. Vol. I, pp. 339-348.

Prowse, T.D., Anderson, J.C. and Smith R.L. (1986), "Discharge Measurement During River Ice Breakup", Proc. 43rd Eastern Snow Conference, Hanover, New Hampshire, pp. 55-69.

Prowse, T.D. (1987), "Monograph on River Ice Jams, River Ice Processes", Submitted to NRCC Working Group on River Ice Jams.

Shen, H.T., Foltyn E.P. and Daly S.F. (1984), "Forecasting Water Temperature Decline and Freeze-up in Rivers", U.S. Army, CRREL Report 84-19, Hanover, N.H.

Sherstone, D.A. (1980), "Photogrammetric Measurement of Discharge in Ice-choked Northern Streams During Spring Breakup" M.A. Thesis, Department of Geography, Carleton University, Ottawa, Canada.

Shulyakovskii, L.G. (1963), "Manual of Forecasting Ice Formation for Rivers and Inland Lakes", Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem.

Tang, P.W. and Davar K.S. (1984), "Forecasting the Initiation of Ice Breakup on the Nashwaak River, N.B.", Proc. Workshop on Hydraulics of River Ice, Fredericton, N.B., pp. 65-93.

U.S. Department of the Army (1982), "Ice Engineering", Engineers Manual, Corps of Engineers, Washington, D.C.

Watson, S.A. (1988), "Interpreting River Ice Breakup History from Photogrammetric Measurements of Ice Jams in the Liard-Mackenzie Rivers, Northwest Territories", M.Sc. Thesis, Watershed Ecosystems Program, Trent University, Peterborough, Ontario.

Please direct inquiries regarding the information presented in this Manual and requests for additional copies to

Water Resource Planning Branch
New Brunswick Department of the Environment
P.O. Box 6000
Fredericton, N.B.
E3B 5H1

(506) 453-2353

GUIDE DES GLACES FLUVIALES AU NOUVEAU-BRUNSWICK

Préparé par
LE SOUS-COMITÉ RESPONSABLE DES GLACES DE COURS D'EAU DU NOUVEAU-BRUNSWICK

Environnement Canada
Direction des eaux intérieures

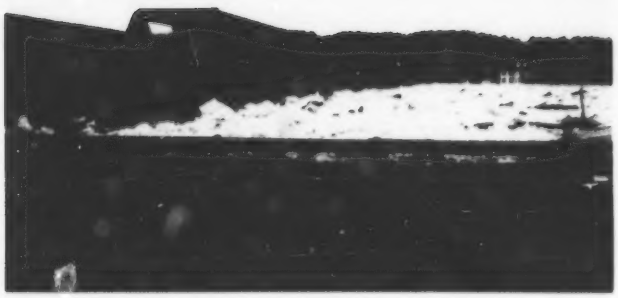
Ministère de l'Environnement
du Nouveau-Brunswick

Août 1989

PRÉFACE

Le Sous-comité responsable des glaces de cours d'eau du Nouveau-Brunswick a été mis sur pied par le Comité technique chargé de la prévision des inondations en vertu du Programme Canada-Nouveau-Brunswick de réduction des dommages causés par les inondations (PRDCA). Les organismes suivants en font partie : ministère de l'Environnement du Nouveau-Brunswick (MENB), Commission d'Énergie électrique du Nouveau-Brunswick (CEENB), Université du Nouveau-Brunswick (UNB) et Environnement Canada représenté par l'Institut national de recherche sur les eaux (INRE), l'Institut national de recherches en hydrologie (INRH), le Service de l'environnement atmosphérique (SEA), la Direction des ressources en eau (DRE) et la Direction de la planification des eaux (DPE).

Le sous-comité joue un rôle de premier plan dans l'identification des problèmes reliés à la glace et dans la coordination des activités visant à trouver des solutions. Ce guide a été préparé pour renseigner le public sur les processus généraux de la glace fluviale, sur les caractéristiques particulières du régime de la glace fluviale du Nouveau-Brunswick, sur les techniques de surveillance et les méthodes de prévision et de contrôle.



Embâcle à un pont ferroviaire.

REMERCIEMENTS

Ce guide n'aurait pas été réalisé sans l'étroite collaboration des organismes membres du sous-comité sur la glace fluviale. Un merci spécial est adressé aux personnes suivantes :

Rédacteurs:

N.E. Elhadi	MENB
J.G. Lockhart	PRDCA

Auteurs:

S. Beltaos	INRE
B.C. Burrell	MENB
K.S. Davar	UNB
J. Dublin	SEA
S. Ismail	CEENB
R.J. Lane	DRE
T.D. Prowse	INRH

Examinateurs:

J.E. Anderson	MENB
T.M. Humes	DPE

Pont s'effondrant sous la force des glaces.

TABLE DES MATIÈRES

TITRE	PAGE
PRÉFACE	i
REMERCIEMENTS	i
TABLE DES MATIÈRES	ii
LISTES DES FIGURES	ii
LISTES DES ILLUSTRATIONS	ii
1 INTRODUCTION	1
2 PROCESSUS DE LA GLACE FLUVIALE	1
2.1 GEL	1
2.1.1 Glace de rive	2
2.1.2 Frasil	2
2.1.3 Nappe de glace thermique	3
2.2 DÉBÂCLE	3
2.2.1 Dégel d'hiver	3
2.2.2 Dégel du printemps	3
2.3 EMBÂCLES	4
3 RÉGIME DE LA GLACE FLUVIALE	4
3.1 CLIMAT	4
3.2 MORPHOLOGIE	5
3.3 RÉGIONS GLACIALES DU NOUVEAU-BRUNSWICK	6
4 SURVEILLANCE DE LA GLACE FLUVIALE	7
4.1 SURVEILLANCE AU SOL	7
4.1.1 Emplacement des sites d'observation	7
4.1.2 Fréquence des observations	7
4.1.3 Observation pendant la période de gel	7
4.1.4 Observations pendant l'hiver	8
4.1.5 Observation avant le dégel	8
4.1.6 Observations de la débâcle	8
4.1.7 Observations des embâcles	8
4.1.8 Observation après la débâcle	9
4.2 OBSERVATIONS PAR SATELLITE	9
4.3 RELEVÉS AÉRIENS	10
5 MÉTHODES DE PRÉVISION	10
5.1 EMBÂCLES PROVOQUÉS PAR LE GEL	10
5.2 DÉBÂCLES	11
5.2.1 Décroissance de la glace	11
5.2.2 Début d'une débacle	11
5.3 EMBÂCLES FORMÉS PAR LA RUPTURE	12
6 CONTRÔLE DE LA GLACE	14
6.1 Réduction des embâcles	14
6.1.1 Ouvrage fixes	14
6.1.2 Estacades	15
6.1.3 Modification du canal	15
6.1.4 Épandage	15
6.1.5 Dynamitage	15
6.1.6 Rupture de la glace	16
6.1.7 Enlèvement mécanique de la glace	16
6.2 ADHÉRENCE DE LA GLACE	16
6.3 NAVIGATION D'HIVER	16
BIBLIOGRAPHIE	17

LISTES DES FIGURES

TITRE	PAGE
1 Conditions pour la formation de la glace de rive	2
2 Formation de la glace fluviale	2
3 Moyenne annuelle accumulée de degrés-jours de gel	4
4 Précipitations totales annuelles	5
5 Chutes de neige annuelles totales	5
6 Régions des glaces fluviales et zones des principaux embâcles	6
7 Profil d'un embâcle flottant avec une portée équilibre	12
8 Rapport adimensionnel pour les niveaux d'équilibre des embâcles formés par la rupture	13
9 Schéma des caractéristiques des crues	13
10 Caractéristiques des crues	13

LISTES DES ILLUSTRATIONS

TITRE	PAGE
1 Formation de la glace de rive	2
2 Accumulation de frasil (Radeaux de glace)	3
3 Fissures longitudinales	3
4 Mûr de cisaillement après la débâcle	9
5 Formation de la glace (Bord avant)	11
6 Embâcles formés par la rupture	12

1. INTRODUCTION

Les problèmes causés par la glace fluviale sont communs au Nouveau-Brunswick en hiver et au printemps, à partir du début de l'hiver, lorsque le frasil et la glace de fond se forment, en passant par la formation et la croissance de la glace de surface, jusqu'aux éventuelles débâcles et embâcles au printemps. Dans plusieurs régions de la province, les embâcles causent souvent des inondations qui détruisent des ponts et entraînent des dommages socio-économiques importants.

Il n'est pas nécessaire de rappeler aux résidents du Nouveau-Brunswick les récents événements reliés à la glace qui ont pris des dimensions presque catastrophiques. En 1970, les descentes de glaces et les embâcles ont détruit 32 ponts et causé des dommages pour une valeur de 14 millions de dollars en dollars constants de 1987. En 1976, les embâcles sur le fleuve Saint-Jean ont causé de graves inondations et dommages à Perth-Andover et Woodstock totalisant 3,6 millions de dollars. Plus récemment, en 1987, un embâcle à la hauteur et en aval de Perth-Andover a causé des dommages de 30 millions de dollars. Les dommages non documentés et incalculables augmenteraient énormément ces chiffres.

Récemment, d'énormes progrès ont été réalisés en ce qui a trait à la compréhension et à la prévision des problèmes de glace et à la réduction au minimum des dommages socio-économiques connexes. Il convient de mettre ces nouvelles connaissances scientifiques à la disposition du public intéressé, puisqu'il est essentiel que le public comprenne ces problèmes et collabore à leur gestion efficace. Le présent guide vise avant tout à présenter les éléments de base des phénomènes des glaces fluviales ainsi qu'à identifier les problèmes que celles-ci entraînent ainsi que les techniques de réduction; il présente une simple et courte analyse des connaissances sur le sujet. La partie 2, donne une description des divers "procédés de glace". Un résumé des conditions météorologiques et une description du régime des glaces au Nouveau-Brunswick sont fournis dans la partie 3. La partie 4 donne diverses techniques de surveillance de la glace de même que les données essentielles à recueillir à l'aide de programmes de surveillance terrestre. Les méthodes de prévision et les applications quantitatives sont résumées dans la partie 5, tandis que les méthodes de contrôle de la glace sont décrites dans la partie 6. Bon nombre des analyses scientifiques et d'ingénierie exigent des procédures théoriques et informatiques complexes qu'il est impossible de décrire dans un document comme celui-ci. Le lecteur qui désire plus d'information peut consulter la bibliographie ci-incluse.

2. PROCESSUS DE LA GLACE FLUVIALE

La plupart des rivières du Nouveau-Brunswick sont recouvertes de glaces pendant la majeure partie de l'hiver. Le phénomène de la glace fluviale est habituellement répartie en périodes de gel et en périodes de dégel. Ses caractéristiques dépendent des conditions météorologiques et de débit qui surviennent lors des périodes de gel et de dégel. Les processus et caractéristiques de la glace fluviale prédominants observés dans les rivières du Nouveau-Brunswick sont présentés dans les parties suivantes.

2.1 GEL

La température de l'air et la vitesse du débit sont les deux plus importants facteurs affectant le processus de glace au cours de la période de gel. L'échange calorifique à la surface d'eau libre est le principal processus par lequel la température de l'eau de la rivière chute à l'automne. Le transfert de chaleur dépend des radiations solaires ou à ondes courtes, du rayonnement de grandes ondes, de l'évaporation ou de la condensation, de la convection et des précipitations. Les taux de pertes thermiques correspondants (taux de la chaleur transférée par superficie unitaire) peuvent être calculés selon les principes hydrothermiques et météorologiques (Michel 1971). Des échanges calorifiques mineurs peuvent également survenir dans le lit du cours d'eau en raison de l'écoulement souterrain, de la chaleur emmagasinée dans les sédiments de fond, de la chaleur géothermique et de la friction du débit. Ces moyens d'échange calorifique sont généralement négligeables mais peuvent devenir importants en présence d'une nappe de glace.

Le taux de perte thermique est souvent calculé comme étant le produit de la différence entre les températures de l'air et de l'eau, et le facteur démontrant les conditions locales et météorologiques. Par exemple, ce facteur variait de 20 à 60 watts/m^{2}°C pour le fleuve Saint-Laurent (Shen et autres, 1984; Prowse, 1987). En connaissant le taux de perte de chaleur et les conditions hydrologiques du cours d'eau, on peut prévoir la température de l'eau. La formation de glace est imminente lorsque la température de l'eau chute à près de 0°C.

Vous trouverez ci-dessous une description du processus de gel pour les types de glace les plus fréquemment observés dans les rivières du Nouveau-Brunswick.

2.1.1 Glace de Rive

La première glace à apparaître sur une rivière se forme habituellement le long des rives où la vélocité est faible (Illustration 1). La glace de rive s'accroît verticalement et latéralement vers le milieu du cours d'eau. La croissance latérale peut avoir lieu même si la température de l'eau principale est légèrement au-dessus du point de congélation, selon la vitesse du débit et les conditions météorologiques, fig. 1 (Devik, 1964). Actuellement, la meilleure façon de prévoir le taux de croissance latérale est d'utiliser les relations empiriques mises au point par Newbury, 1968 et Matousek, 1984.

ILLUSTRATION 1. FORMATION DE LA GLACE DE RIVE.

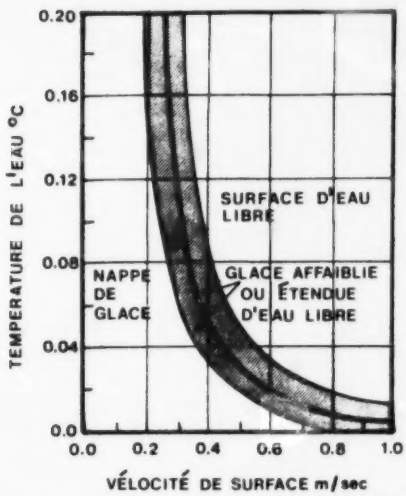


FIG. 1. CONDITIONS POUR LA FORMATION DE LA GLACE DE RIVE.

2.1.2 Frasil

Il apparaît souvent du frasil dans les rivières du Nouveau-Brunswick durant la période de gel et tout au long de l'hiver dans les tronçons turbulents sans glace. Il est formé de petites particules à la suite d'un léger refroidissement rapide de l'eau (à environ -0,05). La quantité de frasil est proportionnelle à l'étendue de la surface d'eau libre et au taux de perte thermique.

Dans l'eau rapidement refroidie, les particules de frasil adhèrent les unes aux autres, formant les "rochers" ou "flocons" de frasil qui flottent et remontent à la surface. Cette propriété de l'adhérence de particules entraîne habituellement une des formes d'accumulation de glace suivantes (fig. 2) :

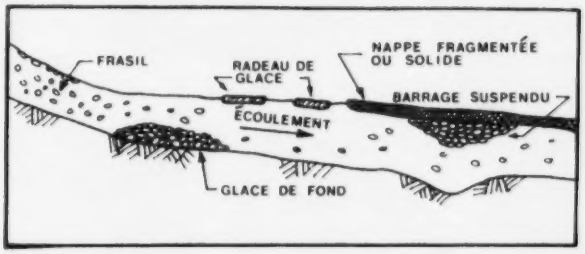


FIG. 2 FORMATION DE LA GLACE FLUVIALE .

(a) Radeaux de glace : Au fur et à mesure que les rochers de frasil prennent de l'expansion, ils forment des radeaux de glace (Illustration 2). Ces radeaux de glace peuvent s'arrêter à un étranglement de canal ou s'échouer contre une nappe de glace dans les parties de la rivière où la vélocité est inférieure à 0,6 m/s ou quand le nombre de Froude est inférieur à 0,08. Le nombre de Froude est défini par $(V/\sqrt{gH})$; V étant la vélocité moyenne, g l'accélération de la gravité et H la profondeur moyenne. Lorsque l'eau de surface continue de perdre de sa chaleur dans l'atmosphère, ces radeaux de glace gèlent ensemble pour former une nappe de glace continue.

(b) Barrages suspendus : L'accumulation de frasil contre une nappe de glace progresse vers l'amont lorsque la vélocité du bord en amont de la nappe de glace est faible. À de grandes vélocités, le frasil est transporté en aval sous la nappe de glace où il adhère au dessous de la glace dans une zone à faible vélocité. À mesure que l'approvisionnement en frasil continue, l'accumulation de glace sous la nappe s'accroît, formant un "barrage suspendu". Un barrage suspendu peut provoquer un vaste blocage extensif du débit dans la zone pour causer une augmentation des niveaux d'eau en amont et d'éventuelles inondations.

ILLUSTRATION 2. ACCUMULATION DE FRASIL (RADEAUX DE GLACE)

(c) Glace de fond : dans les tronçons turbulents des rivières larges et peu profondes, les particules de frasil peuvent adhérer au lit de la rivière et s'agglomérer pour former de la glace "de fond". La glace de fond se forme généralement en soirée lorsque le taux de pertes thermiques est le plus élevé et que le refroidissement rapide se produit. La glace de fond peut provoquer un blocage important de la coupe transversale du débit qui entraînerait une inondation locale. On possède peu de données sur la formation, l'expansion et le détachement de la glace de fond.

2.1.3 Nappe de glace thermique

Dans les rivières ayant des vélocités inférieures à 0,6 m/s et des températures sous le point de congélation, des cristaux de glace se forment à la surface et se lient ensemble pour créer une mince feuille de glace. Une fois formée, cette glace commence à s'accroître vers le bas en gelant à l'interface de la glace et de l'eau. La perte thermique est retardée par la nappe de glace elle-même et par la nappe de neige qui peut s'y trouver. Lorsqu'une accumulation de frasil gèle, le taux d'épaississement de la couche de glace solide est inversement proportionnelle à la porosité de l'accumulation. Une simple formule semi-empirique est souvent utilisée pour calculer l'épaisseur de la glace solide, h_i, en centimètres comme dans :

$$h_i = a_i \sqrt{D_F} \qquad (1)$$

D_F = degrés-jours accumulés de congélation (°C-jours) et a_i = coefficient empirique. Les valeurs de a_i se définissent ainsi : a_i = 2,7 pour un lac venteux sans neige; 1,7 à 2,4 pour un lac moyen avec neige; 1,4 à 1,7 pour une rivière moyenne avec neige; et 0,7 à 1,4 pour une petite rivière abritée avec un débit rapide.

Dans le centre du Nouveau-Brunswick, l'épaisseur des nappes de glace thermiques varie généralement de 38 à 80 cm; selon la rigueur de l'hiver.

2.2 DÉBÂCLE

Le temps doux fait habituellement fondre la couverture de neige et affaiblit la nappe de glace. De plus, les fissures longitudinales et transversales, illustration 3, réduisent davantage la force de la nappe. Le taux de fonte nivale et de précipitations et le ruissellement subséquent sont les principaux facteurs qui entravent le processus de dégel. Un taux élevé de fonte nivale et de précipitations suivi d'une augmentation rapide du débit de la rivière, entraîne normalement une débâcle prématurée d'une nappe de glace relativement forte. Ce type de débâcle peut survenir au milieu de l'hiver ou tôt au printemps, et elle provoque généralement les pires inondations. Par contre, une fonte nivale lente provoque une augmentation graduelle du débit de la rivière et une détérioration graduelle de la nappe de glace, entraînant des pointes de niveaux d'eau beaucoup moins élevées.

ILLUSTRATION 3. FISSURES LONGITUDINALES

2.2.1 Dégel d'hiver

Le centre et le sud du Nouveau-Brunswick connaissent souvent des périodes de temps doux peu saisonnières à la fin de janvier et au début de février. Ces temps sont à l'occasion accompagnées de quantités moyennes de pluie, ce qui entraîne un taux élevé de fonte nivale, et par conséquent, des débits fluviaux élevés. Les forces en aval accrues sont donc exercées sur la nappe de glace, causant des dégels localisés et, dans certains cas, des embâcles et des inondations. Lorsque les températures de congélation du milieu de l'hiver reviennent, l'embâcle peut geler et figer sur place. Dans bon nombre de cas, ce phénomène entraîne des embâcles et des inondations plus graves le printemps suivant.

2.2.2 Dégel du printemps

À la fin de mars ou au début d'avril, un réchauffement général fait fondre la couverture de neige

et dégèle graduellement la nappe de glace. Ce processus est souvent aggravé par les précipitations; il diminue la force de la nappe de glace et augmente le débit du cours d'eau ainsi que les niveaux d'eau. Ces phénomènes augmentent les forces exercées sur la nappe de glace et entraînent la formation de fissures en charnières parallèles aux deux rives, ce qui diminue la résistance de la nappe de glace. À un certain point, à mesure que les forces en aval exercées sur la nappe augmentent pendant que les forces de résistance diminuent, la nappe de glace entame son mouvement qui occasionne la désintégration de la nappe de glace en morceaux se dirigeant vers l'aval. La distance que parcourt la glace dépend des conditions du débit, de la géométrie de la rivière et des conditions météorologiques immédiatement avant et pendant la période de dégel.

À mesure que la glace brisée poursuit son chemin en aval, sa vitesse contribue davantage au dégel de la nappe de glace jusqu'à ce qu'elle se dépose à un point offrant une plus grande résistance; comme à un étranglement de canal, au bord d'une forte nappe de glace, ou au mélange des deux. La durée de séjour de la glace à un endroit spécifique a un impact significatif sur la progression de la débâcle, les niveaux d'eau en amont et l'étendue de l'inondation.

2.3 EMBÂCLES

Les embâcles sont les événements les plus dramatiques provoqués par le dégel et l'accumulation rapide de la glace fluviale fragmentée. Ils provoquent souvent de soudaines augmentations massives du niveau d'eau, entraînant de graves dommages causés par les inondations, dans certains cas supérieurs à ceux reliées aux inondations d'eau libre. Au Nouveau-Brunswick, environ 70 pour cent des dommages causés par les inondations signalées sont provoqués par des inondations reliées à la glace.

Certains endroits sont plus propices à la formation d'embâcles que d'autres : le confluent de deux rivières, les étranglements de canaux, les tournants prononcés, les îles, les ponts, les tronçons de rivières peu profonds, le bord d'une nappe de glace solide, et les changements soudains de la pente de la surface d'eau. Les embâcles sont souvent provoqués par une combinaison de deux ou plusieurs de ces facteurs.

La gravité d'un embâcle est généralement influencée par le débit de la rivière, le volume et la force de la glace fluviale, la durée de la période de dégel, le taux de transfert thermique, la profondeur de la neige et les précipitations. Le débit de la rivière est le plus important facteur déterminant de la gravité d'un embâcle.

3. RÉGIME DE LA GLACE FLUVIALE

3.1 CLIMAT

Le climat est un facteur important qui affecte la formation, la croissance et le dégel de la nappe de glace. Le climat du Nouveau-Brunswick est influencé par sa proximité de l'océan Atlantique et, à un moindre degré, par le Golfe du Saint-Laurent. Toutefois, à l'exception des régions avoisinantes de la Baie de Fundy et du Golfe du Saint-Laurent, le climat est principalement continental, les étés étant chauds et humides et les hivers longs et froids, sans saison sèche.

Les températures varient considérablement dans la province, les températures annuelles moyennes diminuant en remontant vers le nord, allant de 6°C dans l'extrême sud-ouest de la province, à 2°C dans la région au nord d'Edmundston. En janvier, le mois le plus froid de l'année, les températures moyennes annuelles varient de -6°C dans le sud-ouest de la province, à -13°C dans les régions du nord. En hiver, on note souvent des températures minimales de -35°C dans le nord de la province. La période exempte de gel varie d'environ 100 jours dans le nord à 140 jours dans le sud. La moyenne annuelle accumulée de degrés-jours de congélation, igure 3, peut servir d'indice de la rigueur des hivers Les valeurs varient de 500 °C-jours dans le sud-ouest à 1 500 °C-jours dans le nord-ouest.

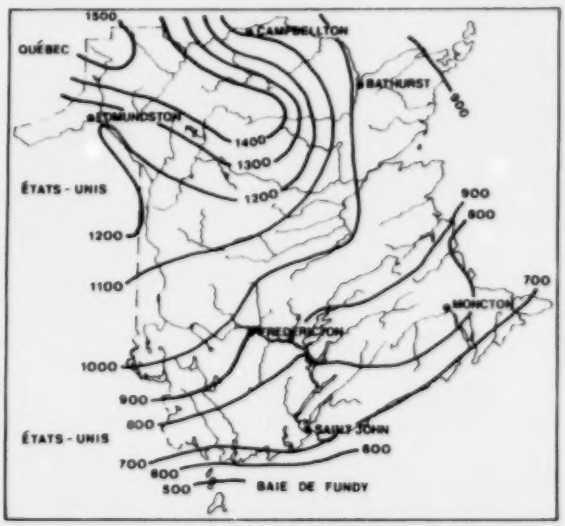


FIG. 3. MOYENNE ANNUELLE ACCUMULÉE DE DEGRÉS-JOURS DE GEL(°C-jours)

Les précipitations annuelles dans la province varient de 950 mm à certains endroits dans le nord-ouest,

à 1 450 mm dans le sud, juste au nord de la Baie de Fundy, et dans les hautes terres au centre du Nouveau-Brunswick, figure 4. La chute de neige totale annuelle au Nouveau-Brunswick varie de 200 cm dans le sud à 400 cm dans le nord et dans les hautes terres au sud de Moncton, figure 5. Le pourcentage des chutes de neige de la précipitation totale varie généralement de 15 dans les régions du sud à 40 dans celles du nord. En moyenne, le Nouveau-Brunswick reçoit plus de chutes de neige que la plupart des autres régions du Canada. La couche de neige de l'hiver fond et s'écoule habituellement en avril et souvent au cours des deux premières semaines de mai.

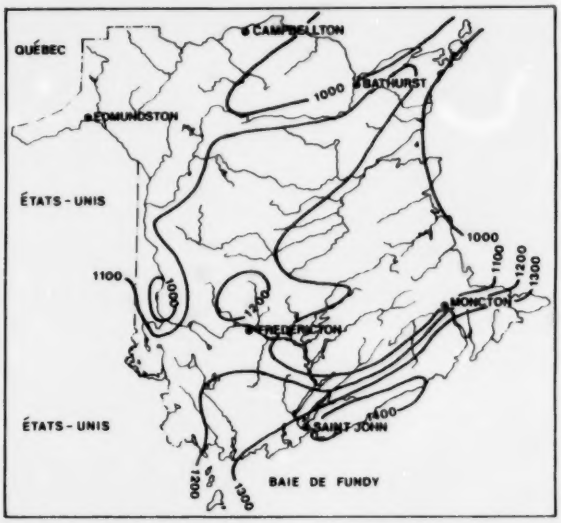


FIG. 4. PRÉCIPITATIONS TOTALES ANNUELLES (mm)

La province est située dans la trajectoire de bon nombre de tempêtes extratropicales qui ont pris naissance le long de la côte est des États-Unis. Les tempêtes extratropicales peuvent survenir à n'importe quel moment de l'année, mais les plus fréquentes et sévères se produisent en hiver lorsque le contraste entre l'air froid continental et l'air marin plus chaud est le plus marqué. Les puissants débits d'air froid qui se forment derrière les tempêtes en formation contribuent grandement à l'intensification de ces tempêtes. Le corridor de tempête a une orientation sud-ouest-nord-est, et son parcours de précipitation tend à s'allonger en direction du corridor de la tempête. Bien que les précipitations puissent être générales pour la majeure partie de la province dans le cas d'une tempête en particulier, les fortes précipitations sont habituellement concentrées dans une bande plutôt étroite, et l'intensité et les quantités tombent rapidement en direction du sud-est et du nord-ouest de la trajectoire de la tempête.

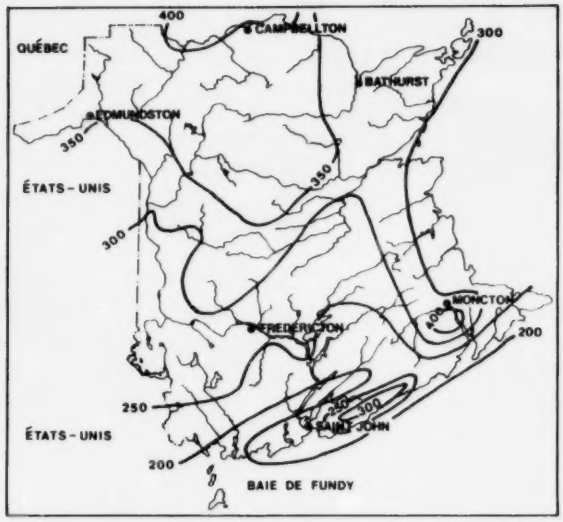


FIG. 5. CHUTES DE NEIGE ANNUELLES TOTALES (cm)

Les dégels au coeur de l'hiver qui entraînent d'importantes fontes de neige sont plus fréquents dans les régions du sud de la province, leur fréquence diminuant en remontant vers le nord. Les fontes de neige importantes causées par un dégel au coeur de l'hiver, tout comme les pluies d'hiver, sont rares dans les régions du nord de la province.

3.2 MORPHOLOGIE

Les caractéristiques physiques d'un bassin versant et la géométrie du canal jouent un rôle important dans le régime des glaces fluviales. Bien que la plupart des rivières du Nouveau-Brunswick soient recouvertes d'une certaine forme de nappe de glace une bonne partie de l'année, il y a quelques rivières sous lesquelles aucune couche de glace solide ne se forme. Il se peut qu'aucune forte nappe de glace ne se forme à la sortie d'eau des lacs ou des réservoirs lorsque l'eau est légèrement plus chaude et plus turbulente. Un bon exemple est la rivière Saint-François près de la sortie d'eau du lac Glasier. Les nappes de glace peuvent également ne pas se former dans des escarpements, des affluents à débit rapide, même si de grandes quantités de frasil sont produites. Par exemple, Dunbar Stream, un petit affluent escarpé de la rivière Nashwaak, demeure ouvert pendant la majeure partie de l'hiver. Enfin, il se peut qu'aucune nappe de glace ne se forme dans des cours d'eau qui ont un approvisionnement en eau plus chaude provenant du lit ou des rives. Par exemple, une couche de glace ne se forme habituellement pas sur la plupart des tronçons du Cold Stream (Au nord-est de la ville de Hartland) bien que d'épaisses nappes de glace solide se forment sur les rivières avoisinantes.

Bon nombre de rivières du Nouveau-Brunswick se déversent dans la mer et les tronçons inférieurs sont à marées. Elles sont souvent caractérisées par des coupes transversales plus larges que les tronçons en amont. On croit que des accumulations importantes de glace dans ces estuaires surviendront quand une période de températures de congélation coïncidera avec les plus grands écarts entre les marées de mer morte et les marées de vive eau subséquentes. Au cours de cette période, des murs de glace verticaux peuvent se former le long des rives en quelques jours, comme dans les tronçons supérieurs des rivières Petitcodiac et Memramcook où les murs de glace peuvent atteindre une hauteur de 5 m. Au printemps, la glace cassée s'accumule souvent près des limites en amont de l'estuaire, mais il est rare qu'il se produise de graves embâcles (Desplanque et Bray, 1984).

3.3 RÉGIONS GLACIALES DU NOUVEAU-BRUNSWICK

Une délimitation des régions avec des régimes de glace fluviale semblables est présentée à la figure 6. Cette illustration est basée sur les données historiques de l'épaisseur de la glace (l'épaisseur moyenne de la glace est d'environ 50 cm), sur l'observation visuelle des conditions de la glace ainsi que sur les caractéristiques climatiques. Cette figure illustre également les régions propices aux embâcles majeurs dans la province.

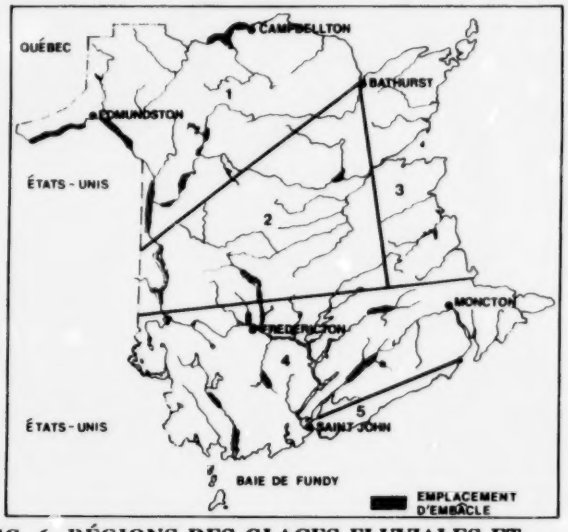


FIG. 6. RÉGIONS DES GLACES FLUVIALES ET ZONES DES PRINCIPAUX EMBÂCLES.

La région 1, dans le nord-ouest du Nouveau-Brunswick, est reconnue en raison de son épaisseur de glace supérieure à la moyenne et d'une épaisse couche de neige. Les importants dégels au milieu de l'hiver et les embâcles connexes sont très rares. La débâcle se produit habituellement à la suite d'une fonte de neige à la mi-avril. Les embâcles que cela entraîne sur les rivières comme la rivière Restigouche peuvent être très graves.

Dans la région 2, au centre du Nouveau-Brunswick, l'épaisseur de la glace fluviale est en général égale ou supérieure à la moyenne susmentionnée, et la couche de neige est également dans la moyenne. Parfois la région subit des dégels au milieu de l'hiver qui entraînent une débâcle, mais des débâcles de modérées à graves prédominent au printemps.

Les rivières de la région 3 qui longe la côte est ont une nappe de glace moyenne et une couche de neige supérieure à la moyenne. Les dégels du milieu de l'hiver sont rares et les embâcles du printemps ne sont habituellement pas graves.

Dans la région 4 qui traverse le sud du Nouveau-Brunswick, les rivières ont normalement une nappe de glace de mince à moyenne ainsi qu'une couche de neige encore plus mince que dans les régions du nord. Les dégels au milieu de l'hiver et les pluies sont plus fréquentes, provoquant des dégels précoces et parfois de graves embâcles semblables à ceux survenus en février 1981 sur la rivière Kennebecasis et ayant causé de graves inondations dans la région de Sussex.

Dans la région 5, le long de la Baie de Fundy, les rivières forment une nappe de glace moyenne avec une épaisse couche de neige. Parfois, il survient de fortes pluies au milieu de l'hiver provoquant des dégels précoces et des embâcles de nature spectaculaire. Une hausse du niveau d'eau de 6 m a été enregistrée dans la rivière Point Wolfe durant un tel incident.

Il y a des différences importantes dans les dates de gel et de dégel entre les cours d'eau du nord et du sud de la province. La glace commence à se former sur les rivières du nord, comme la Restigouche, environ deux semaines avant celles du sud, comme la Kennebecasis. Normalement, le dégel des rivières du nord ne survient pas avant le milieu d'avril, tandis que les cours d'eau du sud sont habituellement libres de glace vers la mi-mars.

Bien qu'il soit possible de généraliser concernant les régimes de la glace fluviale en se fondant sur le climat, il est impossible d'appliquer ces généralisations à des cours d'eau particuliers. On peut mieux comprendre les caractéristiques d'une nappe de glace sur une rivière en particulier en surveillant les conditions de glace pendant un certain nombre de saisons.

4. SURVEILLANCE DE LA GLACE FLUVIALE

Dans les pays les plus au nord, une certaine forme de surveillance des glaces fluviales est assurée, soit dans le cadre d'un programme général de collecte de données ou pour appuyer des études spécifiques. La surveillance de la glace peut être effectuée à l'aide de satellites, de photos aériennes ou d'études au sol.

À l'échelon national, deux organismes d'Environnement Canada -le Service de l'environnement atmosphérique (SEA) et la Division des relevés hydrologiques du Canada (DRHC) de la Direction générale des eaux souterraines - assurent des Programmes de surveillance de glace pour des études générales sur la glace fluviale. Au Nouveau-Brunswick, le SAE recueille de l'information sur la glace à environ 12 endroits, dont 8 rivières et 4 lacs. La DRHC exploite 84 stations hydrométriques, dont 18 sont le site d'études détaillées sur l'épaisseur de la glace.

De l'information plus détaillée sur certaines rivières du Nouveau-Brunswick comme la rivière Restigouche, le fleuve Saint-Jean et les rivières Meduxnekeag, Nashwaak et Kennebecasis, a été recueillie par des organismes provinciaux comme la Commission d'énergie électrique du Nouveau-Brunswick; le département du génie civil de l'Université du Nouveau-Brunswick, et la Direction de la planification des ressources en eau du ministère de l'Environnement du Nouveau-Brunswick. Un résumé des données historique sur l'épaisseur de la glace est présenté dans le rapport LeBrun-Salonen (1983). La surveillance de la glace fluviale peut être effectuée en utilisant diverses méthodes selon les objectifs et les ressources disponibles. La viabilité des techniques de surveillance des études au sol, par satellite et techniques aériennes pour évaluer les conditions des glaces fluviales au Nouveau-Brunswick est examinée ci-dessous.

4.1 SURVEILLANCE AU SOL

La plupart des programmes de surveillance opérationnelle des glaces fluviales dépendent des études au sol pour la majeure partie des données sur la glace. La cueillette d'information détaillée sur la glace à partir des stations terrestres nécessite habituellement un engagement à long terme de la part des observateurs de la glace. Les lignes directrices pour la surveillance au sol des glaces fluviales sont présentées dans les parties suivantes.

4.1.1 Emplacement des sites d'observation

Les sites d'observation de la glace devraient être dans des endroits surélevés avec plus d'un point de surveillance à partir duquel on peut effectuer des observations en amont et en aval. Il serait également préférable d'avoir une station hydrométrique et une station météorologique à proximité. L'accès à un pont est idéal et permet aussi d'obtenir des mesures du débit immédiatement après, et possiblement pendant la débâcle.

4.1.2 Fréquence des observations

La fréquence des visites sur place devrait correspondre avec le degré d'activité de la glace fluviale. Au cours de la période de gel, des visites devraient être effectuées tous les jours. Dès qu'on a établi une nappe de glace intacte, les visites peuvent être réduites à une tous les deux ou quatre semaines, en augmentant la fréquence à l'approche de la période de dégel. Au Nouveau-Brunswick, le début de la période de dégel peut être très rapide lorsqu'elle est précédée d'une période de pluie sur la neige. Dès qu'une fonte appréciable est survenue ou lorsqu'une période de réchauffement importante est prévue, les observations devraient être reprises sur une base quotidienne, autant d'observations par jour que possible devant être effectuées au cours de la période de dégel.

4.1.3 Observation de la période de gel

Il importe de connaître le processus de gel pour l'interprétation des enregistrements de niveau, l'évaluation du débit et ultimement la modélisation prédictive de la période de gel et la prévision du début de la période de dégel. Les principaux types d'observation à effectuer lors de la période de gel comprennent :

a) Niveau et débit : Surveiller l'étape menant à la période de gel, particulièrement lors de la formation de la première nappe de glace permanente. Évaluer ou estimer le débit avant et après le gel.

b) Types de glace et concentration : Noter le type, l'épaisseur et l'étendue latérale de la glace de rive. Évaluer les dimensions, la distribution et la concentration de frasil (ou autre) passant dans le tronçon de la rivière. Lorsqu'une inspection minutieuse de la glace est possible, fournir une estimation qualitative de la force et de la porosité de la glace et noter l'épaisseur et la dimension des radeaux de glace.

c) Méthode de gel : Indiquer si la formation de la nappe de glace complète finale découle de l'accumulation de particules de glace à travers la section ou de l'accumulation de particules de glace contre une nappe en aval.

d) Apparence de la glace : Décrire la surface de la nappe de glace finale en faisant mention

particulièrement du relief de la surface et des types de glace. Estimer l'épaisseur en général.

4.1.4 Observations pendant l'hiver

La croissance de la glace au cours de la saison d'hiver détermine la quantité et la force de la glace au moment du dégel. Les principales observations effectuées au cours de la période d'hiver comprennent :

a) Niveau et débit : Surveiller l'étape durant l'hiver, en faisant particulièrement attention aux périodes où la nappe de glace tombe, en formant des fissures en charnière. Le débit peut être mesuré moins souvent (environ une fois par mois).

b) Épaisseur de la neige et de la glace : Mesurer la profondeur de la surface de la nappe de neige et l'épaisseur de la nappe de glace en-dessous à un certain nombre d'endroits dans la rivière.

c) Composition de la nappe : En mesurant l'épaisseur de la glace, noter l'épaisseur des différentes couches de glace et la présence d'accumulation de frasil sous la couche de glace principale.

d) Apparence de la glace de surface : Noter le relief de la surface de la nappe de glace, y compris l'emplacement des crêtes de pression ainsi que la présence de lignes de cisaillement le long de la rive.

4.1.5 Observations avant le dégel

a) Niveau et débit : Le niveau devrait être mesuré quotidiennement jusqu'à ce que le niveau d'eau approche celui enregistré lors de la période de gel. La fréquence devrait être ensuite augmentée (toutes les huit à douze heures) particulièrement si le temps doux est arrivé et qu'un écoulement important est prévu. Des efforts particuliers devraient être faits pour obtenir une évaluation du débit aussi près que possible du moment de la débâcle.

b) Épaisseur de la neige et de la glace : Dès le début de la principale période de fonte de neige, une étude finale de l'épaisseur de la neige et de la glace dans le tronçon devrait être effectuée avant que le passage sur la surface ne soit plus sécuritaire.

c) Composition de la nappe : Tout comme pour l'étude de l'épaisseur finale, noter l'épaisseur des différentes couches de glace et les accumulations de frasil sous la nappe de glace.

d) Conditions de la surface : Dès que le déplacement en surface est insécuritaire, noter le pourcentage de la zone recouverte de neige, la présence d'eau de fonte stagnante, et le moment du renvoi d'eau de la surface.

e) Conditions de la rive : Noter la profondeur et la largeur de toute eau qui s'accumule près de la rive et la présence d'un écoulement. Décrire également la formation, la dimension et l'emplacement de toute fissure importante, et noter le moment où la nappe de glace principale s'élève et se détache de la rive.

4.1.6 Observations de la débâcle

Pour toutes les observations de la débâcle, des efforts particuliers doivent être faits afin d'obtenir des registres précis de l'étape maximale. L'échelle limnimétrique maximale et les appareils de photo à exposition retardée peuvent être utilisés efficacement pour surveiller l'étape de débâcle.

a) Niveau : Les niveaux d'eau doivent être surveillés aussi souvent que possible. Les points d'intérêt particulier comprennent : le taux d'augmentation du niveau d'eau avant le bris initial et le mouvement de la couche de glace, les niveaux d'eau au premier mouvement de la glace, le niveau d'eau maximum et les changements du niveau d'eau au moment où la glace brisée s'éloigne du tronçon.

b) Début de la débâcle : Le caractère du début de débâcle (en amont) peut varier considérablement, mais il existe habituellement deux styles distincts. Le premier comprend une transition rapide d'une nappe de glace intacte à une glace extrêmement brisée. Dans de tels cas, estimer le taux de déplacement de ce début d'embâcle fracturé en aval. Le deuxième type est caractérisé par une couche de glace fracturée à grande échelle suivie d'un mouvement en aval de plus grands radeaux qui tournent en se brisant. Dans ce deuxième cas, estimer la vitesse de déplacement des radeaux initiaux en aval.

4.1.7 Observations des embâcles

Parce que les embâcles sont responsable des niveaux d'eau plus élevés sur bon nombre de rivières, des données devraient être recueillies concernant leur mode d'initiation et de défaillance, leur effet sur le niveau et même leur dimension en fonction des paramètres élémentaires comme la longueur, la profondeur et la largeur.

a) Niveau et débit : Les niveaux d'eau devraient être surveillés le plus souvent possible. Les points d'intérêt particulier comprennent : La hausse du niveau d'eau lorsque la glace qui se déplace s'arrête, le niveau d'eau maximum lorsque l'embâcle est en place, et le niveau d'eau lorsque l'embâcle se brise et que la glace commence à s'éloigner du tronçon. Prendre des notes ou des photographies du niveau d'eau sur le lieu de l'embâcle par rapport aux objets locaux. Tout changement physique significatif de l'état de l'embâcle au cours de l'étude des niveaux d'eau devrait être noté. Estimer la vélocité du début de la débâcle qui mène à la formation de l'embâcle et la vélocité de la glace de surface lorsque l'embâcle cède.

b) Superficie de l'embâcle : Noter si la glace bloque complètement ou partiellement les rivières. Si elle est visible, noter également l'emplacement des extrémités en aval (début) et en amont (fin) de l'embâcle.

c) Condition au début de l'embâcle : Indiquer si l'embâcle a été arrêté par une obstruction en aval quelconque, par exemple, une nappe de glace intacte, un ouvrage bâti par l'homme, un haut fond, une courbe prononcée, l'étranglement du canal, etc., ou arrêté par des glaces flottantes logées à travers le canal de la rivière.

d) Conditions au début de l'embâcle : Déterminer la dimension et la concentration de la glace qui arrive. Noter également si la glace s'accumule et contribue à la progression en amont de l'embâcle ou si elle est transportée en aval sous l'embâcle.

e) Conditions de la surface : Noter le relief et la texture de la surface de l'embâcle. Évaluer la distance de la rive des lignes de cisaillement qui se sont formées à partir des mouvements différentiels dans l'embâcle. Tenter de déterminer si l'embâcle est formé d'une simple couche de glaces flottantes ou si un compactage ainsi qu'un épaississement de l'embâcle sont visibles. Noter également si la surface est "ceinturée" ou si elle a des montagnes de glace localisées. Ce phénomène peut indiquer que la glace est fixée au lit de la rivière.

4.1.8 Observations après la débâcle

a) Niveau et débit : Poursuivre la surveillance régulière des niveaux d'eau jusqu'à ce que la majeure partie des glaces flottantes soient sorties complètement du tronçon. Lorsqu'il y a un accès, tel qu'un pont, le débit devrait être mesuré dès que la rivière est suffisamment libre de glaces flottantes. Des détails devraient être fournis concernant la stabilité du débit au moment de la mesure et à l'emplacement relatif d'accumulations de glace dans la rivière en amont et en aval du lieu de mesure. Les observations du niveau et du débit devraient continuer jusqu'à ce que les effets de remous en raison de la glace disparaissent.

b) Épaisseur de la glace : Mesurer l'épaisseur des glaces flottantes échouées le long de la rive. Dans la mesure du possible, utiliser les glaces flottantes non déformées par les forces des embâcles. Fournir une courte description de la qualité ou de l'intégrité de la structure des glaces flottantes, par exemple, à savoir si la glace est en aiguilles ou demeure relativement compétente.

c) Dimensions des murs de cisaillement : Après le dégagement de la glace il reste souvent de grandes masses de glace grandement difformes qui ont été plâtrées le long de la rive, illustration 4. Le bord extérieur de ces masses, le mûr de cisaillement, donne normalement un bon indice de l'épaisseur de l'embâcle. Dès que le niveau de l'eau a baissé au point où les mûrs de cisaillement sont exposés, mesurer ou estimer la hauteur globale du mûr et sa distance de la rive du canal.

ILLUSTRATION 4. MÛR DE CISAILLEMENT APRÈS LA DÉBÂCLE.

4.2 OBSERVATIONS PAR SATELLITE

Les satellites peuvent fournir des données sur l'état de la glace fluviale les jours où le ciel est dégagé. La couverture peut être assurée par un des satellites suivants : GOES (Satellite géostationnaire opérationnel pour l'étude du milieu), Landsat II (anciennement ERTS, Satellite d'observation des ressources de la terre), NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration) et SPOT (Système pour l'Observation de la Terre).

La meilleure limite de résolution au sol (10 à 20 m) est assurée par le nouveau satellite français SPOT qui est également doté d'une fréquence orbitale élevée et d'une capacité d'observation avant et arrière. À l'aide des commandes de direction des instruments, il est possible de prendre des images successives du Nouveau-Brunswick environ tous les trois jours. Le principal inconvénient du système SPOT, est le coût exhorbitant de l'image visible et des produits de filmage sur ordinateur.

La deuxième limite de résolution au sol efficace (40 à 80 m) est assurée par le satellite sur orbitre polaire Landsat. Toutefois, l'intervalle de dix-huit jours entre les tours du satellite exclut son utilisation pour l'observation des changements à court terme liés à l'activité de la glace fluviale.

L'imagerie la plus fréquente, pouvant atteindre une fréquence de 30 minutes, est fournie par GOES. La résolution du GOES (imagerie visible 1-km, imagerie thermique 8-km) est beaucoup moins bonne que celle de Landsat ou de SPOT. Le Nouveau-Brunswick est aussi près de la limite nord de l'imagerie utile (environ 50° N).

La couverture quotidienne peut également être obtenue à partir des satellites sur orbitre polaire NOAA à une résolution de 1 km. Les données sur l'AVHRR (Radiomètre perfectionné à très haute résolution) recueillies par ces satellites sont particulièrement utiles pour la surveillance de la glace fluviale.

4.3 RELEVÉS AÉRIENS

La majeure partie des relevés aériens de l'état de la glace ont fait appel à un mode de photographie oblique dont on peut obtenir des renseignements relativement détaillés, tels que l'état et la concentration de la glace, ou les niveaux de l'eau par rapport aux caractéristiques locales. Les relevés aériens peuvent également fournir de l'information quantitative beaucoup plus détaillée lorsque la photographie verticale, plutôt qu'oblique, est utilisée. Des explications détaillées pour l'obtention de relevés aériens sont fournies par Watson (1988). La photographie verticale permet l'utilisation de l'analyse par stéréo- photogrammie qui consiste à mesurer directement les formes de relief et les élévations de l'eau et de la glace. La stéréophotographie peut également être utilisée pour obtenir les mesures détaillées des vélocités des glaces de surface qui peuvent servir à calculer l'écoulement durant les périodes de gel et de dégel (Prowse et autres 1986; Sherstone 1980).

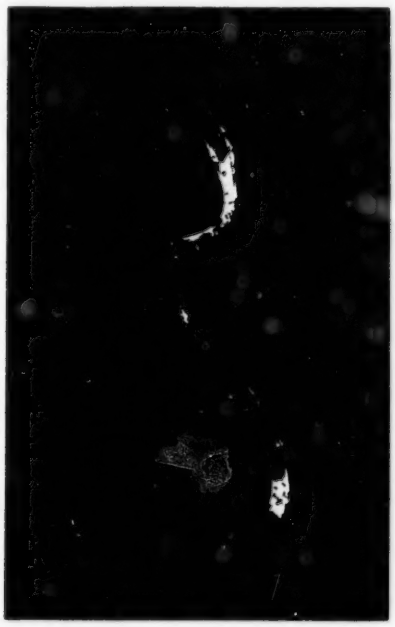


Image de radar aéroporté du fleuve Saint-Jean en aval de Fredericton (l'emplacement d'embâcles, le 3 avril 1987). Division des applications du Centre canadien de télédétection.

5. MÉTHODES DE PRÉVISION

Les aspects pratiques concernant la glace fluviale comportent habituellement la prévision et les avertissements d'inondations ainsi que le choix de mesures de redressement. On peut, dans certains cas, assurer ces aspects par l'application simple des concepts et des formules quantitatifs résumés dans cette partie.

Les modèles numériques conviennent très bien à la résolution d'une vaste gamme de problèmes liés à la glace fluviale; toutefois, certaines conditions peuvent rendre leur utilisation impossible. La modélisation physique pourrait donc être une autre approche ou une approche complémentaire. La grande difficulté dans ce cas repose sur la réduction des caractéristiques de force des nappes de glace intactes (Michel, 1978).

Il est souvent toutefois essentiel de simuler tout le régime des glaces en détail. On peut réaliser cette simulation à l'aide de modèles numériques qui peuvent tenir compte de la géométrie détaillée de la rivière, des variations météorologiques, et des processus physiques de la glace qui se produisent. Il faut souligner, toutefois, que la documentation qui existe actuellement sur la glace fluviale présente de sérieuses lacunes. Ces lacunes sont communément comblées par des hypothèses empiriques "plausibles" appuyées d'observations précises sur place.

5.1 EMBÂCLES PROVOQUÉS PAR LE GEL

Des nappes de glace recouvrant toute la largeur de la rivière peuvent être provoquées par le prolongement et la fermeture graduelles de glace de rive, par l'arrêt de glace feuilletée en mouvement et par la congestion de radeaux de glace en mouvement. Le dernier est le procédé le plus commun au Nouveau-Brunswick, mais il n'est pas prévisible de façon fiable sans observations sur place.

Lorsqu'une congestion survient et que la vélocité du débit ou le nombre de Froude est inférieur à une valeur critique, une nappe de glace dégagée composée d'une seule couche de glaces flottantes est créée. Les vélocités critiques varient d'environ 0,6 à 0,7 m/s pour le frasil et la neige fondante, tandis que les nombres critiques de Froude varient normalement de 0,08 à 0,1. Cette nappe se solidifie ensuite par le gel de l'eau interstitielle. Si le bord avant, illustration 5, de ce genre de nappe arrive dans une zone où la vélocité du débit ou

le nombre de Froude est supérieur à la valeur critique, les glaces flottantes arrivant sont submergées et deux types d'embâcles peuvent se produire, selon les conditions locales.

Le premier type est généralement formé lorsque la vélocité du débit est suffisamment faible pour causer le dépôt des glaces flottantes submergeantes situées en-dessous de la nappe de glace actuelle. Une nappe de glace épaissie et poreuse se formera ensuite et progressera en amont en épaississant, t (Michel, 1971), comme

$$t = 6{,}25\ V_u 2\ /(1\text{-}p)\ g \qquad (2)$$

où V_u est la vélocité moyenne du débit en-dessous de l'accumulation, g = l'accélération de la gravité et p = la porosité de l'accumulation. Ce type de nappe est également connu comme un embâcle "étroit" (Pariset autres., 1966).

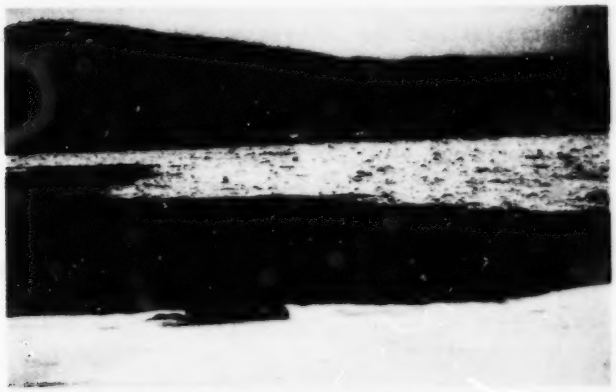


ILLUSTRATION 5. FORMATION DE LA GLACE (BORD AVANT).

Au fur et à mesure qu'une accumulation poreuse de glace ou un embâcle se propage en amont, la force qui y est exercée augmente et, dans certains cas, peut excéder la capacité de résistance de l'embâcle. Les forces exercées résultent principalement de la friction causée par le débit au plus bas niveau de l'embâcle et la composante poids de la glace. L'embâcle s'écroule ou "pousse" et épaissie jusqu'à ce qu'il ne puisse presque plus résister aux forces exercées. Ce type de processus de la glace se produit souvent dans les rivières hydrologiquement "larges". Un bon indicateur pour classer les rivières comme "larges" ou "étroites" est le rapport ($V^2C^2./B$); V = la vélocité en amont de l'accumulation en m/s, C. signifie la rugosité de Chézvy en $m^{0.5}/s$ et B représente la largeur de la rivière en m (Acres International Ltd., 1980). Les embâcles des rivières "larges" se produisent généralement lorsque le rapport ci-dessus est inférieur à 24; autrement, un embâcle d'une rivière "étroite" se produit.

Le deuxième type d'embâcle survient lorsque les glaces flottantes submergeantes sont tranportées par le débit jusqu'à ce qu'elles parviennent à une zone de vélocité réduite et soient déposées dessous la nappe. De très grandes accumulations appelées barrages suspendus, peuvent ainsi se former de cette façon.

5.2 DÉBÂCLES

La décroissance, la fracture, le transport et le dégagement éventuel de la glace dans une rivière, sont les principaux processus qui surviennent pendant la période de débâcle. La débâcle est provoquée par des températures plus chaudes et elle est très importante, parce qu'elle cause souvent de graves embâcles susceptibles de causer beaucoup de dommages.

5.2.1 Décroissance de la glace

Les températures plus chaudes réduisent l'épaisseur et la force de la glace. La fonte de la nappe peut se produire sur les surfaces supérieures et inférieures; il s'agit d'un processus hydrométéorologique complexe. Bilello (1980) a proposé une simple formule pour la réduction de l'épaisseur en cm, Δh_i en raison du climat tempéré :

$$\Delta h_i = a_2\ D_T \qquad (3)$$

accumulation de dégrés - jours de D_T "fonte" (Supérieure à une base de - 5°C); et a_2 = coefficient empirique, se situant entre 0,4 et 1,0 cm/°C-d des rivières du nord canadien et de l'Alaska.

La force de la glace est réduite par la radiation solaire pénétrante, après la hausse des températures de la glace à 0°C. Les températures élevées fondent la glace aux frontières de cristallins (Bulatov, 1972; Ashton, 1983). Dans des cas extrêmes, le résultat est la glace en aiguilles qui n'a presque aucune force. La prévision de la diminution de la force de la glace est toutefois complexe et incertaine lorsqu'il n'existe aucune donnée de calibrage (Prowse, 1987).

5.2.2 Début d'une débâcle

Lorsqu'un écoulement est prévu pour un tronçon de rivière particulier, il importe de pouvoir prédire s'il provoquera le dégel de la nappe de glace ou non. Pour régler ce problème quantitativement, il faut définir le déclenchement de l'embâcle. Il s'agit du moment à partir duquel la nappe de glace à un endroit précis est mise en mouvement pour une période prolongée.

Une approche empirique a été utilisée selon laquelle le déclenchement de la débâcle est censé commencer lorsque le niveau de l'eau monte, d'une

quantité "critique", H_B au-dessus du niveau du dégel précédant. Cette hausse dépend à son tour de l'épaisseur et de la force de la nappe de glace, h_i, Beltaos, 1984; et Shulyakovskii, 1963) et est représentée comme suit :

$$H_B = c\, h_i \qquad (4)$$

c = coefficient adimensionnel spécifique à un site. Le coefficient c dépend de plusieurs variables, telles que la courbe et l'inclinaison de la rivière, la contrainte de cisaillement du débit, la perte de force et d'épaisseur de la glace et l'inclinaison des rives. Dans les cas où les effets thermiques (pertes d'épaisseur et de force) sur la glace sont faibles, la valeur de c a un maximum de c_o à un site précis; c_o varie de 2,2 à 3,5 (Beltaos, 1989). Lorsque les effets thermiques sont considérables, la différence, $c_o h_i - H_B$, a été liée empiriquement à un indice thermique (la version la plus simple étant les degrés-jours accumulés de fonte). Ces rapports sont propres à un site (Beltaos, 1984; Tang et Davar, 1984; Burrell et autres, 1986) et il faut avoir plus de données sur le site pour établir des généralisations.

5.3 EMBÂCLES FORMÉS PAR LA RUPTURE

Une fois le dégel commencé, des embâcles peuvent se former et contrôler largement les événements qui s'ensuivent. Peu de mesures peuvent être prises maintenant concernant la prévision de l'endroit et du moment où les embâcles vont se former; on peut seulement se fier aux expériences déjà vécues. Les embâcles causés par la rupture sont généralement gardées en place par des sections de nappe de glace intactes, illustration 6, et peuvent se former n'importe où dans un tronçon précis. Il y a néanmoins des sites préférés et répétés de formation, selon la présence des formes géomorphologiques et des caractéristiques artifielles propices à la formation d'embâcles (par exemple, courbes prononcées, piliers de ponts, hauts-fonds, baisse de l'inclinaison, etc.)

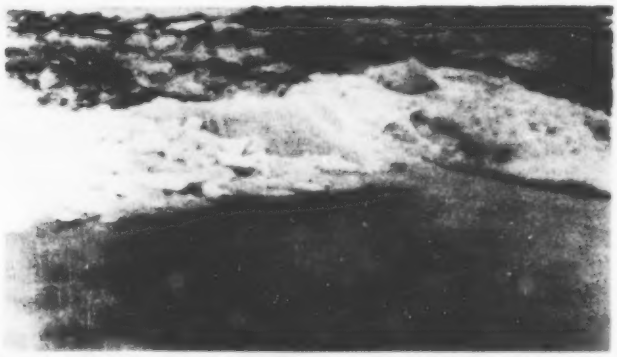


ILLUSTRATION 6. EMBÂCLE FORMÉS PAR LA RUPTURE.

En présumant ou sachant qu'un embâcle s'est formé quelque part dans une rivière, il est possible de prédire les niveaux d'eau qu'il entraîne. Pariset et autres (1966) ont établi la distinction entre des embâcles de cours d'eau "étroits" et "larges", selon leur capacité de résister aux forces exercées, tel qu'il a été déjà expliqué. Le type "étroit" est stable, vu l'épaisseur obtenue dans l'équation 2, tandis que l'embâcle "large" se forme après l'effondrement d'un embâcle "étroit". Règle générale, les embâcles formés par la rupture sont les moins aptes à résister aux forces exercées et tendent à être du type "larges" (Beltaos, 1983); ils présentent donc des risques accrus d'inondations et de dommages. De plus, le débit lors du dégel est habituellement plus élevé que pendant le gel, ce qui augmente les risques d'embâcles formés par la rupture pouvant causer des inondations.

Le calcul des niveaux d'eau actuels causés par les embâcles peut être complexe au point d'exiger des applications d'un modèle numérique; toutefois, des prévisions rapides des niveaux possibles peuvent être établies à l'aide d'une condition "équilibre" qui définit la plus grande profondeur d'eau possible (H_j), figure 7. Cette profondeur peut être estimée à l'aide de la figure 8 (Beltaos, 1983); ou à l'aide de théories plus complexes qui tiennent compte de la géométrie du canal et de la rugosité de l'embâcle.

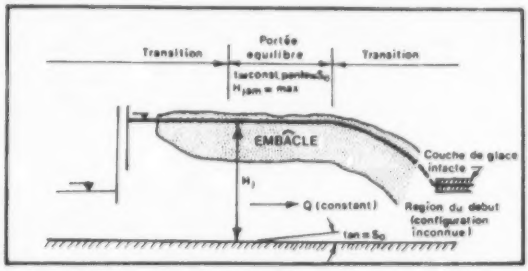


FIG. 7. PROFIL D'UN EMBÂCLE FLOTTANT AVEC UNE PORTÉE ÉQUILIBRE.

Lorsqu'un embâcle débloque soudainement, une vague d'eau raide coulant rapidement en aval de la rivière comme une crue peut causer de graves dommages avec peu d'avertissement. Les conditions menant au dégagement de l'embâcle ne sont généralement pas bien connues, toutefois, Ferrick et autres (1986) ont présenté des données sur place concernant ce phénomène. Il est possible toutefois de prédire approximativement les caractéristiques des crues à l'aide de principes hydrodynamiques. Normalement, cette méthode exige l'application d'un modèle informatique hydrodynamique unidimensionnel du débit non constant (Beltaos et Krishnappan, 1982); toutefois, des estimations rudimentaires peuvent être établies à l'aide de la simple théorie de Henderson et Gerard (1981), résumée dans les

figures 9 et 10. À noter que la gravité de la crue augmente parallèlement à la dimension du cours d'eau. Les grandes rivières devraient connaître de plus grandes crues, ce qui correspond à l'expérience.

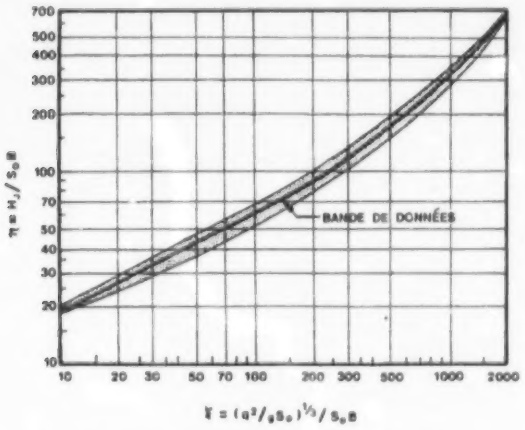


FIG. 8. RAPPORT ADIMENSIONNEL POUR LES NIVEAUX D'ÉQUILIBRE DES EMBÂCLES FORMÉS PAR LA RUPTURE.

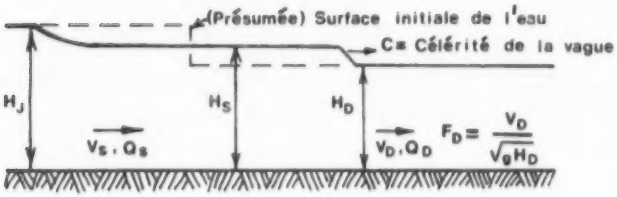


FIG. 9. SCHÉMA DES CARACTÉRISTIQUES DES CRUES.

On peut étudier les faits suivants pour la prévision de l'étape éventuelle d'un embâcle :

Largeur de la rivière (B) = 600 m
Inclinaison (S_o) = 0,0003
Débit (Q_D) = 1 800 m³/s
Unité de débit ($q = Q_D/B$) = 3,0 m²/s

Donc, à l'aide de la formule à la figure 8 $\xi = 81$
À l'aide de la figure 8 $\eta = 55$
Ensuite, H_J = 9,9 m

Afin de démontrer ce qui pourrait se produire en aval lors du dégagement de l'embâcle décrit dans l'exemple ci-dessus, présumons une valeur de H_D = 4,1 m,
Donc, F_D = 0,12 H_J/H_D = 2,4
À l'aide de la Figure 10
$(H_S - H_D)/(H_J - H_D)$ = 0,41
Ainsi, H_S = 6,5 m

Aussi, à partir de la Figure 10
C/V_D = 13,4 Ainsi, C = 9,8 m/s
V_S/V_D = 6 Ainsi, V_S = 4,1 m/s
Q_S/Q_D = 9 Ainsi, Q_S = 16 200 m³/s

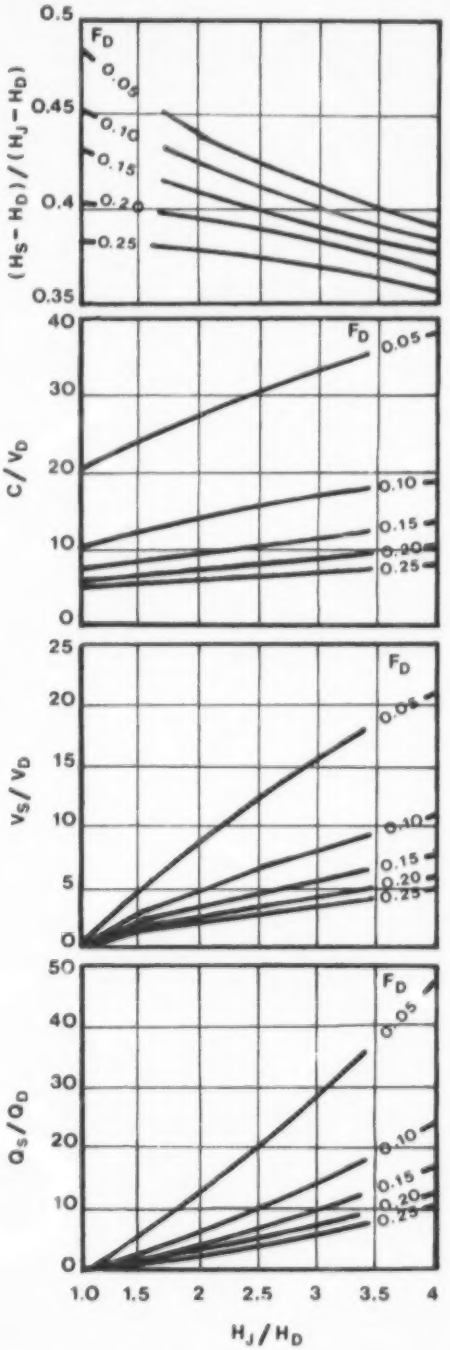


FIGURE 10. CARACTÉRISTIQUES DES CRUES

À noter que V_s estimée ci-dessus (environ 6 fois la vélocité en aval) est une vélocité de l'eau très élevée qui peut se produire dans des conditions d'eau libre, lors de grandes inondations seulement. La célérité de la vague, C, est également très élevée et entraînerait une hausse très rapide des niveaux d'eau en aval. Le débit à la suite du dégagement de l'embâcle est 9 fois le débit de l'eau en aval.

Par contre, dans un cours d'eau d'une largeur de 100 mètres, d'une inclinaison et d'une unité de débit identiques, et d'une valeur prévue de H_D = 4,1 m, il est possible de démontrer que les effets en aval de la crue sont moins graves, tel qu'il est démontré ci-dessous :

H_j	= 5,2 m	
H_s	= 4,6 m	
C/V_D	= 10,5	C = 7,7 m
V_s/V_D	= 2	V_s = 1,5 m/s
Q_s/Q_D	= 3	Q_s = 900 m^3/s

Il faut souligner ici que les techniques ci-dessus servent à établir des prévisions préliminaires des caractéristiques des embâcles et une évaluation du phénomène de la formation et du dégagement d'embâcles. Les lecteurs intéressés aux techniques détaillées de la prévision des embâcles peuvent consulter la liste bibliographique contenue dans ce guide.

Route bloquée par de la glace fluviale.

6. CONTRÔLE DE LA GLACE

Il est parfois souhaitable de contrôler le régime des glaces afin d'éliminer ou de réduire les effets des problèmes entraînés par la glace. Ces problèmes comprennent entre autres : inondations provoquées par des embâcles, perte de production d'énergie hydroélectrique, blocage des voies navigables et dommages aux ouvrages hydrauliques. Cette partie présente les diverses méthodes de contrôle.

6.1 RÉDUCTION DES EMBÂCLES

La réduction des embâcles comprend les mesures prises pour supprimer ou réduire les problèmes qui pourraient survenir à la suite de la formation ou du déblocage d'un embâcle. Il faut faire preuve de beaucoup de compréhension du régime des glaces afin de mettre en oeuvre une des techniques de réduction suivantes.

6.1.1 Ouvrages fixes

Les ouvrages fixes sont utilisés pour stabiliser une nappe de glace ou empêcher le mouvement en aval des bris de glace. La stabilisation d'une nappe de glace empêche ce bris prématuré, ce qui augmente les risques de fonte de glace sur le site, alors que la rétention des glaces flottantes réduit l'approvisionnement de glace aux sites d'embâcles éventuels en aval de la rivière.

Les ouvrages fixes doivent être conçus de façon à résister aux forces exercées. Les forces comprennent l'impact des glaces flottantes en mouvement et l'expansion thermique des glaces feuilletées. La modélisation hydraulique physique peut s'avérer nécessaire lors de la conception et de l'installation des ouvrages fixes destinés à contrôler la glace (Perham, 1984).

Les épis et les jetées peuvent être utilisés pour rétrécir la largeur du cours d'eau (Cumming-Cockburn & Associates Limited, 1986) afin de favoriser l'union des glaces flottantes lors du gel et d'augmenter les niveaux d'eau en amont, améliorant ainsi les conditions hydrologiques en amont pour assurer la stabilité de la nappe de glace. Ces ouvrages créent également un entrepôt pour les glaces flottantes lors de la débâcle, ce qui réduit le volume de glace se déplaçant en aval.

Un barrage de contrôle de la glace obstrue le passage de la glace afin d'empêcher la formation d'embâcles en aval de la rivière (Michel, 1971). Selon la capacité d'entreposage disponible par rapport à l'ampleur de l'inondation du printemps, l'ouvrage de contrôle des

inondations peut retenir toute la glace en amont, jusqu'à ce qu'elle fonde. La plupart du temps, toutefois, cette capacité d'entreposage disponible suffit seulement à retarder le passage des glaces plus faibles. Les ouvrages de contrôle de la glace peuvent toutefois provoquer des embâcles près de la limite en amont du bassin d'amont puisque la force vive de la glace est ralentie considérablement par la glace du bassin d'amont plus forte et une réduction importante du gradient hydraulique. Un barrage de contrôle de la glace assure une fiabilité élevée avec un minimum de surveillance et de fonctionnement; toutefois, d'autres conditions environnementales ou économiques peuvent empêcher son utilisation.

Les déversoirs sont des barrages-déversoirs bas aménagés perpendiculairement au cours d'eau pour hausser les niveaux d'eau en amont afin de créer des conditions qui favorisent la formation d'une nappe de glace stable ou l'accumulation de frasil ou de radeaux de glace. Les déversoirs bien conçus peuvent fournir un bon contrôle de la glace à des sites choisis sur de petites rivières pendant les périodes de gel et de dégel.

6.1.2. Estacades

Les estacades sont aménagées perpendiculairement au cours d'eau afin de contrôler le mouvement de la glace. Elles peuvent être utilisées pour réduire la quantité de glace aux endroits où des embâcles peuvent se former en aval de la rivière en limitant le mouvement de la glace en amont de la rivière et en prolongeant la période d'écoulement des glaces. Les estacades sont utilisées le plus souvent toutefois pour stabiliser ou retenir une nappe de glace en amont de la rivière, lorsque les vélocités sont moins de 0,6 m/s ou que les nombres de Froude sont inférieurs à 0,08. Les estacades sont des pieux attachés ensemble par des chaînes et soutenus par des câbles fixés au lit fluvial. On peut aussi aménager des estacades fixées au quai. Par exemple, l'ouvrage de contrôle de la glace de Montréal utilise des estacades ou des batardeaux placés entre des piliers de béton fixes afin de capter les glaces flottantes et d'aider à stabiliser la nappe de glace plus tôt dans l'hiver, ce qui ne serait pas le cas autrement.

6.1.3. Modification du canal

Les études et les observations (Calkins et autres, 1976) révèlent que les embâcles ont tendance à se former à des endroits où il y a : obstructions à la surface, courbes dans la rivière, modifications à l'inclinaison du canal d'écoulement de la rivière, étranglements, étangs à faible vélocité et sections de rivière peu profondes.

Des modifications peuvent être apportées au canal d'écoulement afin de réduire le risque de formation d'embâcles. Ces modifications comprennent entre autres : enlèvement des étranglements et des obstructions de surface tels que pilotis, piliers de ponts et îles naturelles ainsi qu'enlèvement de barres et de bancs de gravier. Des ouvrages de dérivation du canal peuvent également être aménagés afin de contourner un obstacle à l'écoulement de la glace ou de l'eau. Toutefois, les modifications au canal devraient être évaluées d'après un site particulier.

Au Nouveau-Brunswick, il faut obtenir un permis avant de modifier le lit ou les rives d'un cours d'eau. Les projets sont étudiés afin de protéger les particuliers ou les ouvrages ainsi que l'habitat du poisson et l'environnement qui pourraient être affectés par la modification.

6.1.4 Épandage

L'épandage est l'action d'épandre une mince couche de substance foncée sur une nappe de glace afin de l'affaiblir en raison de l'absorption accrue de la chaleur. Le matériel d'épandage peut être du sable, des cendres volantes ou une autre substance foncée qui ne représentent aucun risque pour l'environnement.

L'épandage peut être effectué afin de prévenir les embâcles aux sites connus pour la formation d'embâcles ou des zones inondables. L'épandage n'est pas efficace sur des surfaces de glace rugueuses telles que les embâcles puisque la capacité de ces surfaces d'absorber la chaleur est très faible.

La coordination de l'épandage est très importante. Si cette activité est effectuée trop tôt, la couche peut être recouverte d'une chute de neige tardive, ce qui diminue son efficacité. Si cette activité est pratiquée trop tard, la glace peut devenir trop faible et pas assez sécuritaire pour permettre l'épandage de la substance; ou la glace pourrait dégeler et provoquer un embâcle avant que la substance d'épandage ne produise un effet.

6.1.5 Dynamitage

Le dynamitage peut être utilisé pour briser une nappe de glace en glaces flottantes qui peuvent être transportées par l'eau en aval ou pour affaiblir une nappe de glace solide avant l'arrivée de la glace en amont. Les explosifs sont habituellement placés dans l'eau en-dessous de la glace. Une plus grande charge est nécessaire si elle est placée sur la glace ou à l'intérieur.

Des explosifs placés aux bons endroits peuvent être utilisés pour enlever des embâcles par le dynamitage de la nappe de glace qui retient l'embâcle. Le moment propice pour débloquer un embâcle est immédiatement

après sa formation. Si le débit a diminué, le dynamitage de l'embâcle sera inefficace en raison de l'insuffisance d'eau pour transporter les morceaux de glace en aval.

Le dynamitage des embâcles est rarement efficace et pose des risques pour l'équipe de dynamitage et les biens avoisinants. Le placement de la charge d'explosifs est une tâche dangereuse qui doit seulement être effectuée par un personnel compétent. Des mesures adéquates de sécurité, de sauvetage et de premiers secours devraient être en place avant le début des travaux.

6.1.6. Rupture de la glace

La rupture de la glace désigne la rupture, le sciage ou la séparation d'une nappe de glace pour la faire fondre plus vite ou pour la briser en petits morceaux plus faciles à transporter lors de la montée des niveaux d'eau. La rupture de la glace peut seulement être effectuée si la nappe de glace est assez forte pour supporter l'équipement de rupture et les équipes.

La ville d'Ottawa a un programme de coupe et de dynamitage de la glace sur la rivière Rideau afin d'empêcher la formation d'embâcles. Des bandes d'une largeur d'environ 15 à 20 m sont coupées là où la glace a tendance à demeurer solide. Les équipes forent et dynamitent ensuite la glace à l'extrémité en aval avant l'arrivée des écoulements du printemps. On a également eu recours à la rupture de la glace pour empêcher les embâcles dans la rivière Beaurivage près de la ville de Québec. La rupture de la glace présente de nombreux avantages comparativement aux techniques de dynamitage; elle brise plus de glace que le dynamitage, son coût est un tiers de celui du dynamitage, elle n'a pas d'impacts environnementaux et elle est généralement sécuritaire.

6.1.7. Enlèvement mécanique de la glace

Pour les petits cours d'eau accessibles à partir des rives, il est possible d'enlever la glace à l'aide de matériel de construction, tel que des pelles mécaniques à godet retourné et des grues à benne traînante, avant que des embâcles ne se forment. L'enlèvement efficace et sécuritaire de la glace dépend en partie de l'opérateur de l'équipement qui doit faire preuve de jugement au fur et à mesure des opérations d'enlèvement.

6.2 ADHÉRENCE DE LA GLACE

L'adhérence du frasil surefroidi aux ouvrages (grilles de retenue des débris, écluses hydrauliques, etc.) présente un autre problème important. Il y a plusieurs solutions à ce problème. Une des approches consiste à chauffer la surface à laquelle adhère la glace. Pour ce faire, il faut mettre de la vapeur ou de l'eau tiède sur la zone touchée ou incorporer une résistance électrique ou chauffer celui-ci à l'eau chaude ou à la vapeur. On vise à maintenir la température de la surface au-dessus du point de congélation afin que la glace n'y adhère pas.

Une autre approche consiste à utiliser des matériaux de construction et des revêtements auxquels la glace adhère très peu, ce qui la rend facile à enlever. Un revêtement en plastique fabriqué à partir d'une solution copolymère de toulène et d'huile de silicone (Ashton, 1986) s'est avéré efficace.

6.3 NAVIGATION D'HIVER

Il se fait peu de navigation d'hiver si non aucune sur les rivières du Nouveau-Brunswick pendant la saison de la glace, sauf les activités des traversiers sur les rivières et la pénétration limitée des navires des haute-mers sur les estuaires de rivières. Les brise-glace sont souvent utilisés pour contrôler la glace fluviale afin de permettre la navigation.

Des systèmes à bulles d'air peuvent également empêcher efficacement la croissance d'une nappe de glace solide aux écluses de navigation, dans les installations portuaires et dans les passages de traversiers, mais ils sont peu pratiques pour de longs tronçons de rivières. Dans un système à bulles d'air, un hydrojet propulsé par de l'eau tempérée est dirigé vers le haut afin de fondre ou de réduire l'accumulation de glace fluviale. La panache d'eau tempérée coulante créée par les bulles d'air montantes s'étend en montant et fond la nappe de glace (Ashton, 1986). Le critère le plus important pour assurer le bon fonctionnement d'un système à bulles d'air est un approvisionnement d'eau plus chaude près du lit (U.S. Department of Army, 1982).

Maisons entourées de glace et d'eau montante.

BIBLIOGRAPHIE

Acres International Ltd. (1980), "Behavior of Ice Covers Subject to Large Daily Flow and Level Fluctuations", pour l'Association canadienne de l'électricité.

Ashton, G.D. (1983), "First Generation Model of Ice Deterioration", Délibérations de la Conference on Frontiers in Hydraulic Engineering, ASCE, New York, pp. 273-278.

Ashton, G.D. (1986), "River and Lake Ice Engineering", Water Resources Publications, Littleton, Colorado, É.-U.

Beltaos, S. et Krishnappan B.B. (1982), "Surges from Ice Jam Releases: A Case Study", Canadian Journal of Civil Engineering, vol. 9, n° 2, pp. 276-284.

Beltaos, S. (1983), "River Ice Jams: Theory, Case Studies and Applications", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, vol. 109, n° 10, pp. 1338-1359.

Beltaos, S. (1984), "Study of River Ice Breakup using Hydrometric Station Records", Actes d'un atelier sur l'hydrologie de la glace fluviale, Fredericton, N.-B., Canada, pp. 41-59.

Beltaos, S. (1989), "Initial Fracture and Breakup of River Ice Control", Institut national de recherche sur les eaux, Burlington, Ontario.

Bilello, M.A. (1980), "Maximum Thickness and Subsequent Decay of Lake and Fast Sea Ice in Canada and Alaska", U.S. Army CRREL Report 80-6, Hanover, N.H.

Bulatov, S.N. (1972), "Computation of the Strength of the Melting Ice Cover of Rivers and Reservoirs and Forecasting of the Time of its Erosion", Actes du Symposium on the Role of Snow and Ice in Hydrology, Banff, Canada, pp. 575-580.

Burrell, B.C., Tang, P.W., Lane, R., et Beltaos, S. (1986), "Study of Ice Breakup in the Meduxnekeag River, N.B., Using Hydrometric Station Records", Actes du 4e colloque sur l'hydrologie de la glace fluviale, Montréal.

Calkins, D.J., Hulton, M.S. et Marlar, T.L. (1976), "Analysis of Potential Ice Jam Sites on the Connecticut River at Windsor, Vermont", Report 76-31, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, U.S. Army Corps of Engineers. Hanover, New Hampshire.

Cumming-Cockburn & Associates Ltd. (1986), "Ice Jams on Small Rivers, Remedial Measures and Monitoring", Willowdale, Ontario.

Desplanque, C. et Bray, D.I. (1984), "Winter Regime in the Tidal Estuaries of the Northern Portion of the Bay of Fundy, N.B.", Actes d'un colloque sur l'hydrologie de la glace fluviale, Fredericton, N.-B.

Devik, O. (1964), "Present Experience on Ice Problems Connected with the Utilization of Water Power in Norway", Journal de l'Association internationale des recherches hydrologiques, vol. 2, n° 1, pp. 25-40.

Ferrick, M., Lemieux G., Mulherin N. et Dement W. (1986), "Controlled River Ice Cover Breakup, Part 1. Hudson River Field Experiments", Symposium de l'AIRH sur la glace, ville d'Iowa, Iowa, É.-U.

Henderson, F.M. et Gérard R. (1981), "Flood Waves Caused by Ice Jam Formation and Failure", Actes du Symposium de l'AIRH sur la glace, Québec, Canada, vol. 1, pp. 277-287.

Le Brun-Salonen, M.L. (1983), "Average Solid Ice Thickness in New Brunswick Rivers", Rapport n° 2.03, Préparé dans le cadre du Programme de relance de l'aide à l'emploi, Fredericton, N.-B.

Matousek, V. (1984), "Regularity of the Freezing-up of the Water Surface and Heat Exchange Between Water Body and Water Surface", Actes du Symposium de l'AIRH sur la glace, Hamburg.

Michel, B. (1971), "Winter Regime of Rivers and Lakes", U.S. Army CRREL Monograph 111-B1a, Hanover, N.H.

Michel, B. (1978), "Ice Mechanics", Les Presses de l'Université Laval, Québec, Canada.

Newbury, R.W. (1968), "The Nelson River: A Study of Subarctic River Processes", Thèse de Ph.D., Université John Hopkins.

Pariset, E., Hausser R. et Gagnon A. (1966), "Formation of Ice Covers and Ice Jams in Rivers", Journal of the Hydraulics Division, ASCE, vol. 92 (HY6), pp. 1-24.

Perham, R.E. (1984), "Ice Sheet Retention Structures", Actes du Symposium de l'AIRH sur la glace, Association internationale de recherches hydrologiques, Hambourg, Allemagne de l'ouest. vol. I, pp. 339-348.

Prowse, T.D., Anderson, J.C. et Smith R.L. (1986), "Discharge Measurement During River Ice Breakup", Actes de la 43e Conférence de l'est sur la neige, Hanover, New Hampshire, pp. 55-69.

Prowse, T.D. (1987), "Monograph on River Ice Jams, River Ice Processes", soumis par le NRCC Working Group on River Ice Jams.

Shen, H.T., Foltyn, E.P. et Daly, S.F. (1984), "Forecasting Water Temperature Decline and Freeze-up in Rivers", U.S. Army, CRREL Report 84-19, Hanover, N.H.

Sherstone, D.A. (1980), "Photogrammetric Measurement of Discharge in Ice-choked Northern Streams During Spring Breakup" Thèse M.A., Département de géographie, Université de Carleton, Ottawa. Canada.

Shulyakovskii, L.G. (1963), "Manual of Forecasting Ice Formation for Rivers and Inland Lakes", Israel Program for Scientific Translations, Jérusalem.

Tang, P.W. et Davar K.S. (1984), "Forecasting the Initiation of Ice Breakup on the Nashwaak River, N.B.", Actes de l'atelier sur l'hydrologie de la glace fluviale, Fredericton, N.-B., pp. 65-93.

U.S. Department of the Army (1982), "Ice Engineering", Engineers Manual, Corps of Engineers, Washington, D.C.

Watson, S.A. (1988), "Interpreting River Ice Breakup History from Photogrammetric Measurements of Ice Jams in the Liard-Mackenzie Rivers, Northwest Territories", Thèse de M.Sc., Watershed Ecosystems Program, Université Trent, Peterborough, Ontario

Pour toute question concernant l'information présentée dans ce guide et pour des exemplaires supplémentaires, prière de s'adresser directement à la:

Direction de la planification des ressources en eau
Ministère de l'Environnement du Nouveau-Brunswick
C.P. 6000
Fredericton (N.-B.)
E3B 5H1

(506) 453-2353